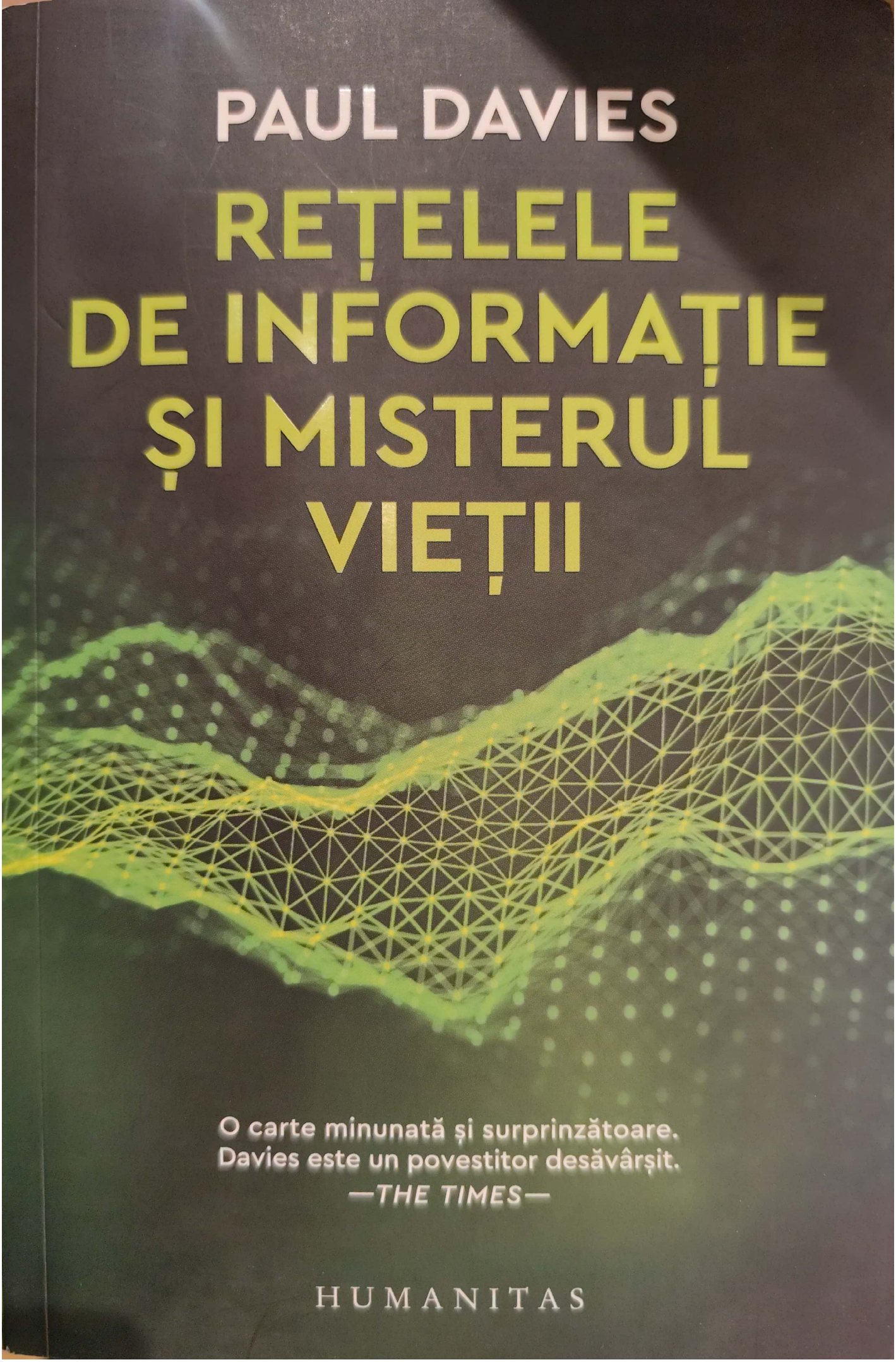
PAUL DAVIES

REȚELELE DE INFORMAȚIE ȘI MISTERUL VIEȚII



O carte minunată și surprinzătoare.
Davies este un povestitor desăvârșit.
—THE TIMES—

HUMANITAS

Scanned with OKEN Scanner

Există multe cărți despre ce face viața. Cartea aceasta discută ce *este* viața. Sunt fascinat de funcționarea organismelor, de ceea ce permite materiei vii să realizeze lucruri atât de uimitoare, lucruri de care materia neînsufletită nu e capabilă. De unde provine diferența? Până și o umilă bacterie realizează lucruri atât de uluitoare, atât de surprinzătoare, încât nici un inginer nu le poate egala. Viața pare să fie ceva magic, un lucru ale cărui taine sunt învăluite într-o mantie de impenetrabilă complexitate. În ultimele decenii, descoperirile uriașe din biologie nu au făcut decât să sporească misterul. Ce anume dă ființelor acel imbold enigmatic care le diferențiază de alte sisteme fizice, făcându-le remarcabile și deosebite? Și de unde se trage tot acest caracter aparte? —PAUL DAVIES

© DamienGeso/iStock

Scanned with OKEN Scanner

Paul Davies s-a născut la Londra în 1946. După ce a obținut doctoratul la University College, și-a început cariera academică la Cambridge, sub îndrumarea lui Fred Hoyle. La 34 de ani a fost numit profesor de fizică teoretică la Universitatea din Newcastle. Din 1990 a început să colaboreze cu universități australiene (Adelaide și Macquarie), iar în prezent e profesor la Universitatea de Stat din Arizona și director al Centrului pentru Concepte Fundamentale în Știință. Activitatea științifică a lui Paul Davies cuprinde un spectru larg: fizică teoretică, cosmologie (cu importante contribuții în domeniul stărilor cuantice ale vidului și în cel al găurilor negre) și astrobiologie (în 2005 a fost numit la conducerea Institutului SETI, care studiază posibilitatea existenței vieții în univers). Paul Davies este unul dintre cei mai reputați popularizatori ai științei. A realizat seriale TV pentru BBC și televiziunea australiană și publică frecvent articole în ziare și reviste de mare tiraj. Pentru această activitate a primit în 2001 Medalia Kelvin din partea Institutului de Fizică al Regatului Unit, iar în 2002, Premiul Michael Faraday din partea Societății Regale. Printre cele peste 25 de cărți de popularizare scrise de Paul Davies se numără *The Runaway Universe*, *Other Worlds*, *The Edge of Infinity*, *The Last Three Minutes* (*Ultimele trei minute*, Humanitas, 2008), *The Mind of God*, *The Cosmic Blueprint*, *Superforce*, *How to Build a Time Machine*, *The Origin of Life*, *Information and the Nature of Reality: From Physics to Metaphysics*.

Scanned with OKEN Scanner

PAUL DAVIES

REȚELELE DE INFORMAȚIE ȘI MISTERUL VIEȚII

Traducere din engleză
de George Arion Jr.

HUMANITAS
BUCUREȘTI

Scanned with OKEN Scanner

Redactor: Alexandru Anghel
Coperta: Ioana Nedelcu
Tehnoredactor: Manuela Măxineanu
Corector: Cristina Jelescu
DTP: Dragoș Dumitrescu, Dan Dulgheru

Tipărit la Artprint

Paul Davies
The Demon in the Machine.
How hidden webs of information are solving the mystery of life
First published in 2019 by Allen Lane, an imprint of Penguin Books
Copyright © Paul Davies, 2019
The moral right of the author has been asserted.

© HUMANITAS, 2021, pentru prezenta versiune românească

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
Davies, Paul
Rețelele de informație și misterul vieții / Paul Davies;
trad. din engleză de George Arion jr. – București: Humanitas, 2021
Index
ISBN 978-973-50-7276-6
I. Arion, George, jr. (trad.)
57

EDITURA HUMANITAS
Piața Presei Libere 1, 013701 București, România
tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51
www.humanitas.ro

Comenzi online: www.libhumanitas.ro
Comenzi prin e-mail: vanzari@libhumanitas.ro
Comenzi telefonice: 0723 684 194

Scanned with OKEN Scanner

Rămâne curiozitatea [...] de a înțelege mai limpede cum aceeași materie care în fizică și chimie prezintă proprietăți ordonate, reproductibile și relativ simple se aranjează în cele mai uimitoare chipuri imediat ce e atrasă în orbita organismului viu. Cu cât privim mai îndeaproape aceste reprezentații ale materiei în organismele vii, cu atât mai impresionant devine spectacolul. Chiar și cea mai răuvoitoare celulă vie devine o cutie enigmatică magică plină de molecule elaborate și dinamice. —Max Delbrück*

* Max Delbrück, *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*, vol. 38, 173–190 (decembrie 1949).

Scanned with OKEN Scanner

CUPRINS

Prefață 9

1. Ce *este* viața? 15
2. Demonul intră în scenă 41
3. Logica vieții 88
4. Darwinism 2.0 138
5. Viața fantomatică și demonii cuantici 181
6. Aproape un miracol 208
7. Fantoma din mașină 230

Epilog 261

Note 273
Lecturi suplimentare 285
Creditele ilustrațiilor 291
Indice 293

Scanned with OKEN Scanner

PREFAȚĂ

Există multe cărți despre ce face viața. Cartea aceasta discută ce *este* viața. Sunt fascinat de funcționarea organismelor, de ceea ce permite materiei vii să realizeze lucruri atât de uimitoare, lucruri de care materia neînsuflețită nu e capabilă. De unde provine diferența? Până și o umilă bacterie realizează lucruri atât de uluitoare, atât de surprinzătoare, încât nici un inginer nu le poate egala. Viața pare să fie ceva magic, un fenomen ale cărui taine sunt învăluite într-o mantie de impenetrabilă complexitate. În ultimele decenii, descoperirile uriașe din biologie nu au făcut decât să sporească misterul. Ce anume dă ființelor acel imbold enigmatic care le diferențiază de alte sisteme fizice, făcându-le remarcabile și deosebite? Și de unde se trage tot acest caracter aparte?

Sunt multe întrebări, și multe sunt întrebări mari. De ele m-am ocupat în cea mai mare parte a vieții mele profesionale. Nu sunt biolog, ci fizician și cosmolog, astfel încât abordez marile întrebări evitând multe dintre amănuntele tehnice și concentrându-mă asupra principiilor fundamentale. Exact asta fac și în cartea de față. Am încercat să mă concentrez asupra enigmelor și conceptelor care contează cu adevărat, în încercarea de a răspunde întrebării arzătoare: *Ce este viața?* Nu sunt primul fizician care își pune această întrebare: îmi iau ca punct de plecare o serie celebră de prelegeri (intitulate „Ce este viața?“)

Scanned with OKEN Scanner

prin care marele fizician Erwin Schrödinger, specialist în fizică cuantică, căuta să răspundă în urmă cu trei generații la o întrebare pe care Darwin o evitase. Însă cred că acum suntem pe cale să găsim un răspuns întrebării lui Schrödinger, iar răspunsul va aduce după sine o nouă eră a științei.

Marea prăpastie care separă fizica și biologia (tărâmul atomilor și moleculelor de tărâmul organismelor vii) rămâne de netrecut dacă nu ne folosim de concepte fundamental noi. Organismele vii au obiective și scopuri (produsul a miliarde de ani de evoluție), în timp ce atomii și moleculele urmează orbește legile fizicii. Totuși, cumva, una trebuie să provină din cealaltă. Deși mare parte din comunitatea științifică recunoaște nevoia de a reconceptualiza viața drept fenomen *fizic*, oamenii de știință minimalizează frecvent cât de dificilă s-a dovedit încercarea de a înțelege pe deplin natura și originea vieții.

Căutarea „verigii lipsă" care să facă legătura dintre non-viață și viață într-un cadru unitar a condus la apariția unui domeniu științific complet nou aflat la interfața dintre biologie, fizică, informatică și matematică. Este un domeniu extrem de promițător, nu doar pentru că ar putea explica în cele din urmă viața, ci și pentru că ar putea deschide calea spre aplicații care vor transforma nanotehnologia și vor duce la progrese uriașe în medicină. Conceptul unificator care se află la baza acestei transformări este *informația*, nu în sensul ei prozaic, cotidian, ci în sensul unei cantități abstracte care, asemenea energiei, are capacitatea să anime materia. Tiparele fluxului de informație pot căpăta efectiv viață proprie: ele străbat celulele și creierul și formează rețele în cadrul a întregi ecosisteme și societăți, dezvăluindu-și propria dinamică sistematică. Din fermentul bogat și complex al informației apare capacitatea de a acționa, alături de legăturile sale cu conștiința, liberul-arbitru și alte enigme greu de dezlegat. Tocmai acest fel în care sistemele vii aranjează informația în tipare organizate produce ordinea definitorie a vieții din haosul lumii moleculare.

Scanned with OKEN Scanner

Oamenii de știință abia acum încep să înțeleagă puterea informației în calitate de *cauză* ce poate avea un impact real în lume. Legile care întrepătrund informația, energia, căldura și lucrul mecanic au fost aplicate recent asupra organismelor vii, mergând de la nivelul ADN-ului, al mecanismelor celulare, al neuroștiințelor și al organizării sociale până la cel planetar. Dacă privim prin lentila teoriei informației, vom vedea o imagine a vieții mult diferită de cea tradițională oferită de biologie, care pune accent pe anatomie și fiziologie.

Multe persoane m-au ajutat să pun laolaltă conținutul acestei cărți. O mulțime dintre ideile pe care le veți descoperi aici sunt inspirate de colega mea Sara Walker, director-adjunct al Beyond Center for Fundamental Concepts in Science, care mi-a influențat mult gândirea în ultimii cinci ani. Sara îmi împărtășește entuziasmul de a căuta o mare teorie unificatoare a fizicii și biologiei, organizată în jurul conceptului de informație. „Viața este următoarea mare frontieră a fizicii!" spune ea. De asemenea, de un mare folos mi-au fost discuțiile cu studenții și postdoctoranzii din grupul nostru de la Universitatea de Stat din Arizona (ASU). Îi menționez aici în special pe Alyssa Adams, Hyunju Kim și Cole Matthis. Dintre numeroșii mei colegi străluciți de la ASU, Athena Aktipis, Ariel Anbar, Manfred Laublicher, Stuart Lindsay, Michael Lynch, Carlo Maley, Timothea Newman (care acum predă la Universitatea din Dundee) și Ted Pavlic m-au ajutat în mod deosebit. Mai departe, pun mare preț pe discuțiile purtate de-a lungul mai multor ani cu Christoph Adami, de la Universitatea de Stat din Michigan, Gregory Chaitin, de la Universitatea Federală din Rio de Janeiro, James Crutchfield, de la Universitatea din California, Davis, Andrew Briggis, de la Universitatea Oxford, David Chalmers, de la Universitatea din New York, Lee Cronin, de la Universitatea din Glasgow, Max Tegmark, de la MIT, Steven Benner, de la Fundația pentru Evoluție Moleculară Aplicată, Michael Berry, de la Universitatea din Bristol, George Ellis, de

Scanned with OKEN Scanner

la Universitatea din Cape Town, Piet Hut, de la Institutul Ştiinţelor Pământului şi Vieţii, Tokyo, şi de la Institutul pentru Studii Avansate, Pricenton, Stuart Kauffman, de la Institutul Biologiei Sistemelor, Charles Linewear, de la Universitatea Naţională Australiană, care polemizează în spirit de glumă cu aproape tot ce spun şi scriu, şi Christopher McKay, de la NASA Ames.

Tot în Australia, Derek Abbott, de la Universitatea din Adelaide, mi-a limpezit câteva aspecte despre fizica vieţii, iar John Mattick, vizionarul director al Institutului Garvan din Sydney, m-a învăţat că genetica şi microbiologia nu sunt domenii finalizate. De la Paul Griffiths, Universitatea din Sydney, am primit amănunte profunde despre natura evoluţiei şi epigeneticii, în vreme ce Mihail Prokopenko şi Joe Lizier, de la aceeaşi universitate, mi-au modelat gândirea despre teoria reţelelor şi mi-au oferit impresii critice. Johnjoe McFadden şi Jim Al-Khalili, de la Universitatea din Surrey, Birgitta Whaley, de la Universitatea din California, Berkeley, şi Philip Ball, autor al unor lucrări de popularizare a ştiinţei, mi-au oferit comentarii valoroase asupra capitolului 5. Peter Hoffmann, de la Universitatea de Stat din Wayne, a avut amabilitatea să-mi explice anumite subtilităţi ale clicheţilor. Giulio Tononi, de la Universitatea din Wisconsin, Madison, şi colegii săi, Larissa Albantakis şi Erik Hoel, aflat acum la Universitatea Columbia, au încercat să mă lămurească cu privire la informaţiile integrate. Institutul din Santa Fe a fost şi el o sursă de inspiraţie: David Krakauer şi David Wolpert m-au uluit cu erudiţia lor. Michael Levin, de la Universitatea Tufts, este un colaborator pe care-l preţuiesc foarte mult, dar şi unul dintre cei mai cutezători biologi pe care-i cunosc. Am profitat, de asemenea, de pe urma unor schimburi extrem de vii cu informaticianul şi consultantul în afaceri Perry Marshall.

Incursiunea mea în domeniul oncologiei a avut drept rezultat formarea unei reţele bogate şi distinse de gânditori străluciţi care m-au ajutat să înţeleg cancerul în particular şi viaţa

Scanned with OKEN Scanner

în general. La ASU am lucrat îndeaproape cu Kimberly Bussey și Luis Cisneros asupra unor proiecte legate de cancer și am primit un ajutor important de la Mark Vincent, Universitatea din Ontario, și Robert Austin, de la Universitatea Princeton. Cunoștințele mele despre genetica cancerului au fost sporite mult în urma discuțiilor cu David Goode și Anna Trigos, de la Centrul Peter MacCallum, Melbourne, dar și cu James Shapiro, de la Universitatea din Chicago. Am fost influențat de Mina Bissell, Brendon Coventry și Thea Tlsty prin lucrările lor, dar și de mulți alții, prea mulți ca să-i enumăr aici. Trebuie să mulțumesc și Institutului Național al Cancerului, care a susținut cu generozitate, timp de cinci ani, mare parte dintre cercetările din domeniul oncologiei despre care discut în carte, și NantWorks, care încă le sprijină. Viziunea Annei Barker, fost director-adjunct al Institutului Național al Cancerului și acum colegă a mea la ASU, a fost cea care m-a împins în direcția cercetărilor din domeniul oncologiei. În plus, Templeton World Charity Foundation a fost un susținător puternic al grupului nostru de cercetare despre originea vieții prin intermediul programului „Power of Information".

Aș dori să mulțumesc și Penguin Books, editura mea loială, și mai ales lui Tom Penn, Chloe Currens și Sarah Day pentru splendida lor contribuție redacțională.

În încheiere, trebuie să-i mulțumesc lui Pauline Davies, care a citit cu atenție trei variante întregi ale cărții și mi le-a trimis înapoi, pe rând, însemnate din belșug, spre revizuire. Am discutat cu ea despre multe aspecte tehnice ale cărții în fiecare zi în ultimul an, iar conținutul volumului de față a fost mult îmbunătățit cu ajutorul său. Fără sprijinul ei neșovăitor, fără aprecierile ei și fără mintea ei ascuțită, proiectul de față nu ar fi fost niciodată dus la bun sfârșit în mod mulțumitor.

PAUL DAVIES

Sydney și Phoenix, decembrie 2017

Scanned with OKEN Scanner

1. CE *ESTE* VIAȚA?

În februarie 1943, fizicianul Erwin Schrödinger a ținut o serie de prelegeri la Trinity College, Dublin, cu titlul *Ce este viața?* Schrödinger era o vedetă, laureat al Premiului Nobel și recunoscut la nivel mondial drept părintele mecanicii cuantice, cea mai de succes teorie științifică din istorie. La puțin timp de la formularea sa în anii '20, această teorie explicase deja structura atomilor, proprietățile nucleilor atomici, radioactivitatea, comportamentul particulelor subatomice, legăturile chimice, proprietățile termice și electrice ale corpurilor solide și stabilitatea stelelor.

Propria contribuție a lui Schrödinger în domeniul mecanicii cuantice începuse în 1926 cu o ecuație nouă care încă îi poartă numele și care descrie mișcarea și interacțiunea electronilor și a altor particule subatomice. Următorii zece ani au reprezentat o epocă de aur pentru fizică, cu progrese foarte importante pe aproape toate fronturile: de la descoperirea antimateriei și a expansiunii universului până la anticiparea neutrinilor și a găurilor negre, datorată în mare parte puterii mecanicii cuantice de a explica lumea atomică și subatomică. Însă această perioadă prolifică s-a sfârșit brusc când lumea a fost aruncată în vâltoarea celui de-al Doilea Război Mondial. Mulți oameni de știință au fugit din Europa nazistă în Marea Britanie sau Statele Unite ca să sprijine tabăra Aliaților. Schrödinger a luat și

Scanned with OKEN Scanner

el parte la exod, părăsind Austria natală după ocupația nazistă din 1938, dar a hotărât să-și găsească un cămin în neutra Irlandă. În 1940, președintele Irlandei, Éamon de Valera, el însuși fizician, a întemeiat un nou Institut de Studii Avansate la Dublin. Chiar de Valera a fost cel care l-a invitat pe Schrödinger în Irlanda, unde acesta a rămas vreme de 16 ani, însoțit de soție și amantă sub același acoperiș.

În anii '40, biologia se afla cu mult în urma fizicii. Amănuntele despre procesele de bază ale vieții rămâneau în mare parte un mister. În plus, însăși natura vieții părea să sfideze una dintre legile fundamentale ale fizicii (a doua lege a termodinamicii), conform căreia există o tendință universală spre degenerare și dezordine. În prelegerile sale din Dublin, Schrödinger a prezentat problema așa cum o vedea el: „Cum pot fi explicate de fizică și chimie evenimentele din spațiu și timp care au loc în interiorul limitelor spațiale ale unui organism viu?" Cu alte cuvinte, pot proprietățile uluitoare ale organismelor să fie în cele din urmă reduse la fizica atomică, sau mai există și altceva în spatele lor? Schrödinger evidențiază tocmai această chestiune fundamentală. Pentru ca viața să genereze ordine din dezordine și să ocolească a doua lege a termodinamicii, trebuie să existe o entitate moleculară care cumva *a codat* instrucțiunile pentru construirea unui organism, o entitate suficient de complexă încât să cuprindă o cantitate vastă de informații și suficient de stabilă încât să reziste la efectele degradării postulate de termodinamică. Acum știm că această entitate este ADN-ul.

În lumina observațiilor pătrunzătoare ale lui Schrödinger, publicate sub formă de carte în anul următor, domeniul biologiei moleculare a explodat. Elucidarea structurii ADN-ului, spargerea codului genetic și contopirea geneticii cu teoria evoluționistă au urmat la foarte puțin timp după aceea. Succesele biologiei moleculare erau atât de rapide și de fulminante, încât mulți oameni de știință au adoptat o perspectivă puternic re-

Scanned with OKEN Scanner

ducționistă: părea că proprietățile uimitoare ale materiei vii pot fi explicate în cele din urmă numai în termeni de fizică atomică și moleculară și că nu era nevoie de ceva fundamental nou. Schrödinger era însă mai puțin optimist: „Materia vie, cu toate că nu eludează «legile fizicii» așa cum au fost stabilite până acum, poate să implice «alte legi ale fizicii», încă necunoscute".[1] Nu era singurul care avea această părere. Alți colegi și părinți ai mecanicii cuantice, precum Niels Bohr și Werner Heisenberg, erau și ei de părere că materia vie are nevoie de o fizică nouă.

Reducționismul puternic e încă dominant în biologie. Perspectiva consacrată rămâne aceea că nu avem nevoie decât de fizica pe care o cunoaștem acum pentru a explica viața, chiar dacă majoritatea detaliilor nu au fost încă lămurite. Eu nu sunt de acord. Asemenea lui Schrödinger, cred că organismele vii manifestă principii fizice noi și profunde și că suntem pe cale să descoperim și să exploatăm aceste principii. Motivul pentru care a durat atâtea decenii să descoperim adevăratul secret al vieții este acela că noua fizică nu e pur și simplu o chestiune care ține de un tip suplimentar de forță (o „forță vitală"), ci de ceva cu totul mai subtil, ceva care întrețese materie și informații, întreguri și părți, simplitate și complexitate.

Acest „ceva" constituie subiectul central al cărții de față.

CASETA 1: CUTIA ENIGMATICĂ MAGICĂ

Dacă întrebăm „Ce este viața?", încep să ni se prezinte o mulțime de calități. Organismele vii se reproduc, sunt capabile de transformări fără limite prin evoluție, inventează sisteme și structuri complet noi navigând prin spațiul posibilităților de-a lungul unor traiectorii imposibil de prezis, folosesc algoritmi sofisticați pentru a calcula strategii de supraviețuire, creează ordine din haos mergând împotriva curentului cosmic al degenerării și descompunerii, dau dovadă de scopuri clare și exploatează diverse surse de energie pentru a le atinge, formează rețele de o complexitate inimaginabilă, cooperează și concurează între ele și așa mai

Scanned with OKEN Scanner

departe. Pentru a răspunde la întrebarea lui Schrödinger trebuie să cuprindem *toate* aceste proprietăți, unind punctele din întreg spectrul științific pentru a formula o teorie organizată. Este o aventură intelectuală care întreține fundamentele logicii și matematicii, paradoxurile autoreferențiale, teoriile computaționale, știința motoarelor termice, progresele nanothenologiei, domeniul emergent al termodinamicii stărilor aflate departe de echilibru și enigmaticul domeniu al fizicii cuantice. Trăsătura care unește toate aceste subiecte este *informația*, concept deopotrivă familiar și pragmatic, dar și abstract și matematic, aflat la temelia biologiei și fizicii.

Charles Darwin afirma la un moment dat că „este interesant să privim malul unei ape, acoperit cu numeroase plante de diferite specii, cu păsări cântând în tufișuri, cu numeroase insecte zburând prin aer și cu viermi târându-se pe pământul umed și să ne gândim că toate aceste forme, atât de admirabil construite, atât de diferite între ele și depinzând într-un mod atât de complex unele de altele, au fost toate produse de legi care au acționat în jurul nostru“[2]. Lucrul de care nu și-a dat seama Darwin e că această complexitate materială (hardware-ul vieții) este pătrunsă de o și mai surprinzătoare complexitate *informațională* (software-ul vieții), care e nevăzută și care călăuzește adaptarea și formarea structurilor noi. Aici, în domeniul informației, întâlnim adevărata putere creatoare a vieții. În momentul de față, oamenii de știință îmbină hardware-ul și software-ul într-o nouă teorie a vieții ce are ramificații uriașe în domenii care merg de la astrobiologie la medicină.

Adio, forță vitală

De-a lungul istoriei, s-a observat că organismele vii au puteri ciudate, cum ar fi capacitatea de a se mișca autonom, de a-și rearanja mediul și de a se reproduce. Filozoful grec Aristotel a încercat să surprindă această alteritate printr-un concept cunoscut drept *teleologie* (derivat din grecescul *telos*, „țel“ sau „finalitate“). Aristotel a observat că organismele au comportamente motivate de scopuri și că acționează conform unui plan sau proiect presta-

Scanned with OKEN Scanner

bilit, activitățile lor fiind îndreptate către o stare finală: obținerea hranei, construirea unui cuib sau procrearea prin sex.

La începutul epocii științifice, exista perspectiva conform căreia lucrurile sunt alcătuite dintr-un fel de materie magică sau, cel puțin, din materie normală pătrunsă de un ingredient suplimentar. Această perspectivă e cunoscută sub numele de *vitalism*. Nu se știa exact ce anume e, de fapt, această esență adăugată. Printre variante se numărau aerul (suflarea de viață), căldura, electricitatea sau ceva mistic, precum sufletul. Oricum, teoria potrivit căreia materia e animată de o „forță vitală" specială sau de o energie eterică a rămas larg răspândită până în secolul al XIX-lea.

Odată cu îmbunătățirea tehnicilor științifice, cum ar fi apariția microscoapelor puternice, biologii au descoperit tot mai multe surprize care păreau să necesite existența unei forțe vitale. O enigmă importantă era dezvoltarea embrionilor. Cine nu ar fi uluit de felul în care o singură celulă-ou fertilizată, prea mică pentru a fi văzută cu ochiul liber, se poate dezvolta într-un bebeluș? Ce anume ghidează organizarea complexă a embrionului? Cum se poate dezvolta atât de bine încât să producă un rezultat ce dă dovadă de o armonie aproape ireproșabilă? Embriologul german Hans Dreisch a fost frapat de o serie de experimente pe care le-a efectuat în 1885. Dreisch a mutilat mai mulți embrioni de arici de mare (o victimă favorită a biologilor), care apoi își reveneau cumva și se dezvoltau normal. A descoperit chiar că poate să descompună embrionul după apariția primelor celule și să lase fiecare celulă în parte să crească într-un arici de mare întreg. Aceste rezultate i-au dat lui Dreisch impresia că celulele embrionare au un fel de „idee în avans" asupra formei finale pe care intenționau s-o creeze și compensau în mod inteligent fiecare intervenție a experimentatorului. Parcă o mână invizibilă le supraveghea creșterea și dezvoltarea, efectuând „corecții" dacă era nevoie. Pentru Dreisch, aceste fapte au reprezentat dovezi puternice în

Scanned with OKEN Scanner

favoarea existenței unui fel de esență vitală pe care a numit-o *entelehie*, adică „formă completă, perfectă, finală“ în greacă, o idee foarte apropiată de teleologia lui Aristotel.

Dar forța vitală era în primejdie. Pentru a realiza ceva, o astfel de forță trebuie (asemenea tuturor forțelor) să poată mișca materie. La prima vedere, organismele chiar par să se propulseze singure, să dețină un fel de sursă internă de putere motrică. Însă exercitarea oricărei forțe implică degajare de energie. Astfel, dacă „forța vitală“ e reală, atunci transferul de energie ar trebui să fie măsurabil. Fizicianul Hermann von Helmholtz a cercetat tocmai această chestiune în anii 1840. Într-o serie de experimente, a aplicat impulsuri electrice unor picioare de broască, fapt care le-a făcut să zvâcnească, și a măsurat cu grijă variațiile minuscule de temperatură ce însoțeau mișcările. Helmholtz a tras concluzia că în mușchi era înmagazinată energie chimică și că, odată activată de impulsul electric, aceasta era transformată în energia mecanică a zvâcnirilor, care la rândul ei se disipa sub formă de căldură. Calculele cu privire la consumul de energie ieșeau foarte bine, fără dovada necesității folosirii unor forțe vitale suplimentare. Însă vitalismul a dispărut complet abia după câteva decenii.*

Chiar și fără o forță vitală, e greu să scăpăm de impresia că materia vie are *ceva* special. Dar ce anume?

Această enigmă a început să mă fascineze după ce, în studenție, am citit cartea lui Schrödinger, *Ce este viața?* La un anumit nivel, răspunsul e simplu: organismele vii se reproduc, metabolizează, răspund la stimuli și așa mai departe. Însă simpla enumerare a proprietăților vieții nu echivalează cu faptul de a o *explica*, lucru pe care Schrödinger intenționa să-l facă. Chiar dacă am fost inspirat de cartea lui, mi s-a părut că

---

* Vitalismul a suferit și de pe urma faptului că, din punct de vedere conceptual, era prea asemănător altei concepții din secolul al XIX-lea, și anume spiritualismul cu teoriile lui bizare despre ectoplasmă și corpuri eterice.

Scanned with OKEN Scanner

avea o perspectivă incompletă. Pentru mine era limpede că viața trebuie să presupună mai mult decât simpla fizică a atomilor și moleculelor. Cu toate că Schrödinger a sugerat că e posibil să acționeze și un fel de fizică nouă, nu a descris-o în vreun fel. Descoperirile ulterioare din biologia moleculară și din biofizică ne-au oferit câteva indicii. Însă, în ultima vreme și dintr-o direcție complet neașteptată, a început să se întrevadă conturul unei soluții.

Viața naște surprize

În acest univers, metalele comune pot fi transmutate în aur numai de stele și de ființe inteligente care înțeleg procesele ce alimentează stelele. —David Deutsch[3]

Pentru a înțelege răspunsul la întrebarea schrödingeriană „Ce este viața?", va trebui să renunțăm la lista tradițională de proprietăți pe care le înșiră biologii și să începem să ne gândim la această stare într-un mod cu totul diferit. Să ne întrebăm prin ce ar fi diferită lumea dacă nu ar exista viață. Cu toții știm că planeta noastră a fost modelată în parte de biologie: acumularea de oxigen în atmosferă, formarea depozitelor minerale, efectele resimțite la nivel global ale tehnologiei umane. Există și multe procese lipsite de viață care au modelat planeta: erupții vulcanice, impacturi cu asteroizi, glaciațiuni. Diferența esențială este că viața produce procese care ar fi nu doar improbabile, ci chiar *imposibile* altfel. Ce altceva poate zbura în cealaltă parte a globului cu precizie uluitoare (chira arctică), ce altceva poate transforma lumina solară în energie electrică cu o eficiență de 90% (frunzele) sau ce altceva poate construi rețele complexe de tuneluri subterane (termitele)?

Bineînțeles, tehnologia omului (un produs al vieții) poate face toate aceste lucruri, ba chiar mai mult. Să exemplific: vreme de 4,5 miliarde de ani, de când s-a format sistemul solar,

Scanned with OKEN Scanner

Pământul a acumulat material (termenul tehnic este „acreție") de la impacturile cu asteroizi și comete. Obiecte de diferite mărimi, de la sute de kilometri în diametru până la mici particule de meteoriți, au căzut pe suprafața planetei noastre de-a lungul istoriei ei. Cei mai mulți știm despre cometa care a distrus dinozaurii și care a căzut pe teritoriul actual al Mexicului în urmă cu 65 de milioane de ani, dar acesta e doar un exemplu. Toate aceste milioane de ani de bombardament ne spun că planeta noastră e puțin mai grea astăzi decât era în trecut. Însă, din 1958, a început să aibă loc „anti-acreția".[4] Fără să se fi petrecut vreo catastrofă geologică, un roi uriaș de obiecte au plecat în sens invers, de pe Pământ în spațiu: unele ca să ajungă pe Lună și alte planete, altele ca să ajungă definitiv în neant. Cele mai multe au sfârșit prin a descrie orbite permanente în jurul Pământului. Ar fi fost imposibil să se ajungă la această situație numai în baza legilor mecanicii și a evoluției planetare. Acest fenomen nu poate fi explicat decât prin tehnologia rachetelor dezvoltată de oameni.

Un alt exemplu. Când s-a format sistemul solar, o mică parte din inventarul lui chimic inițial includea și plutoniul. Întrucât cel mai longeviv izotop al plutoniului are o perioadă de înjumătățire de 81 de milioane de ani, practic tot plutoniul primordial s-a descompus până acum. Însă, în 1940, plutoniul a reapărut pe Pământ ca rezultat al experimentelor din fizica nucleară (acum se estimează că ar exista o mie de tone de plutoniu). Fără viață, creșterea bruscă a cantității de plutoniu de pe Pământ ar fi complet inexplicabilă. Nu există nici o modalitate non-vitală de a ajunge de la o planetă veche de 4,5 miliarde de ani la una pe care există zăcăminte de plutoniu.

Viața nu doar realizează aceste schimbări în mod oportunist, ci se diversifică și se adaptează, invadând noi nișe și inventând mecanisme ingenioase de supraviețuire, uneori prin mijloace extraordinare. La trei kilometri sub pământ în mina de aur sud-africană Mponeng există colonii de bacterii exotice

Scanned with OKEN Scanner

care se cuibăresc în porii microscopici ai rocilor încinse și aurifere izolate de restul biosferei planetei noastre. Nu le susține nici un fel de lumină și nu există materie organică pe care s-o consume. Sursa existenței microbilor este, în chip uimitor, radioactivitatea. În mod normal letale pentru viață, radiațiile nucleare care emană din pietre le oferă locuitorilor subterani suficientă energie, descompunând moleculele de apă în oxigen și hidrogen. Bacteriile, cunoscute sub denumirea de *Desulforudis audaxviator*, au dezvoltat mecanisme de exploatare a produșilor chimici secundari ai radiațiilor, creând biomasă prin combinarea hidrogenului cu dioxidul de carbon dizolvat în apa clocotită ce scaldă pietrele.

La o depărtare de opt mii de kilometri, în inima secată a Deșertului Atacama, soarele nemilos se ridică deasupra unui peisaj unic. Cât vezi cu ochii nu există decât nisip și pietre, și nicăieri vreo urmă de viață. Nici o pasăre, nici o insectă, nici o plantă nu înfrumusețează priveliștea. Nimic nu aleargă prin praf, nici un petic verde nu trădează prezența măcar a unor simple alge. Toate formele de viață cunoscute au nevoie de apă lichidă, iar în această regiune din Atacama practic nu plouă niciodată, fapt care o face cea mai uscată și mai moartă regiune de pe suprafața Pământului.

Mijlocul Deșertului Atacama e zona de pe Pământ care seamănă cel mai mult din punct de vedere al condițiilor cu suprafața planetei Marte, astfel încât NASA a construit acolo o stație unde testează teorii despre solul marțian. Oamenii de știință au început să studieze mai întâi limitele exterioare ale vieții (le place să spună că se află în căutarea morții, nu a vieții), dar descoperirea pe care au făcut-o i-a surprins complet. Împrăștiați printre denivelările rocilor din deșert se ridică niște stâlpi ciudați, incrustați cu nisip, de aproximativ un metru înălțime, rotunjiți, cu protuberanțe, care par o aglomerare de sculpturi concepute de Salvador Dalí. Aceste excrescențe sunt, de fapt, alcătuite din sare, sunt rămășițele unui lac străvechi care s-a

Scanned with OKEN Scanner

evaporat cu mult timp în urmă. În interiorul stâlpilor, efectiv îngropați în sare, sunt microbi vii care reușesc să supraviețuiască în ciuda tuturor așteptărilor. Aceste organisme ciudate și foarte diferite, numite *Chroococcidiopsis*, nu își iau energia din radioactivitate, ci într-un mod mai convențional, prin fotosinteză: lumina puternică a soarelui din deșert ajunge până în bârlogurile lor translucide. Însă mai rămâne problema apei. Această parte a Deșertului Atacama se află la aproximativ 100 de kilometri în interiorul continentului față de Oceanul Pacific, de care mai e separat și printr-un lanț de munți. În condițiile potrivite, câteva fuioare de ceață de pe mare se strecoară prin trecătorile montane noaptea, când temperaturile scad foarte mult. Aerul umed introduce molecule de apă în structura de sare. Apa nu formează picături lichide, în schimb sarea se umezește și devine lipicioasă, un fenomen cunoscut cititorilor care trăiesc în zone cu climă umedă și care sunt familiarizați cu solnițele încăpățânate în care sarea se lipește. Absorbția vaporilor de apă în sare se numește delicvescență și e un proces suficient de eficient pentru a-i face pe microbi fericiți până când soarele dimineții usucă sarea.

Desulforudis audaxviator și *Chroococcidiopsis* sunt două exemple care ilustrează capacitatea extraordinară a organismelor vii de a supraviețui în condiții cât se poate de vitrege. Alți microbi reușesc să înfrunte frigul sau căldura extreme, salinitatea și contaminarea cu metale și o aciditate îndeajuns de cumplită încât să ardă carnea omenească. Descoperirea acestei menajerii de microbi rezistenți care trăiesc la limită (numiți colectiv extremofile) a răsturnat credința că viața poate înflori numai între limitele înguste ale temperaturii, presiunii, acidității ș.a.m.d. Însă capacitatea vieții de a crea noi structuri fizice și chimice și de a se folosi de o gamă neașteptată de surse de energie ilustrează felul în care, odată apărută, aceasta are potențialul să se răspândească mult dincolo de habitatul ei inițial și să declanșeze transformări neașteptate. În viitorul înde-

Scanned with OKEN Scanner

părtat, e posibil ca oamenii sau descendenții lor robotici să poată reconfigura întregul sistem solar sau chiar galaxia. Poate că alte forme de viață din alte părți ale universului fac ceva asemănător sau poate că o vor face și ele. Acum, că viața a fost dezlănțuită în univers, are în ea potențialul să aducă schimbări de importanță literalmente cosmică.

Enervanta problemă a indicatorului vieții

Un dicton din știință spune că dacă ceva e real, atunci ar trebui să-l putem măsura (și poate chiar să-l impozităm). Putem măsura viața? Sau „nivelul de vitalitate"? Poate părea o întrebare abstractă, dar, în ultima vreme, a început să capete importanță reală. În 1997, agențiile spațiale din Statele Unite și Europa au colaborat pentru a trimite către Saturn și sateliții săi nava spațială numită *Cassini*. Cercetătorii erau interesați mai ales de Titan, cel mai mare satelit natural din sistemul solar. Titan a fost descoperit de Christiaan Huygens în 1655 și a fost vreme îndelungată o curiozitate pentru astronomi, nu numai din pricina dimensiunilor, ci și pentru că e acoperit de nori. Până la misiunea *Cassini*, ceea ce se ascundea sub stratul de nori fusese literalmente învăluit în mister. Sonda *Cassini* purta o sondă mică, numită Huygens, care a fost lansată prin norii lui Titan și a asolizat în siguranță pe suprafața lui Titan. Huygens a dezvăluit un relief cu oceane și plaje, dar oceanele sunt formate din etan și metan lichid, iar rocile din gheață. Titan e foarte rece, având o temperatură medie de –180°C.

Astrobiologii erau foarte interesați de rezultatele misiunii *Cassini*. Se știa deja că atmosfera lui Titan e un smog petrochimic gros, cu nori plini de molecule organice. Însă, din pricina frigului extrem, acest corp ceresc nu ar putea susține viața așa cum o cunoaștem. S-au făcut speculații conform cărora o formă de viață exotică ar putea folosi metanul lichid ca substitut pentru apă, însă mulți astrobiologi sunt de părere că așa ceva

Scanned with OKEN Scanner

e puțin probabil. Însă, chiar dacă ar fi complet mort, Titan rămâne relevant în ceea ce privește enigma vieții. De fapt, acest satelit natural constituie un laborator natural de chimie care a produs molecule organice complexe pe parcursul întregii sale vieți de 4,5 miliarde de ani. Ca să ne exprimăm mai colocvial, Titan e un soi de experiment biologic ratat, fapt care ne aruncă în miezul problemei pe care o pune întrebarea „ce este viața?" Dacă Titan a parcurs (din punct de vedere chimic) o parte din drumul lung și sinuos care pe Pământ a avut drept rezultat viața, *cât de aproape* a ajuns Titan de linia de sosire numită „biologia începe aici"? Am putea spune că Titan se apropie acum de punctul în care poate genera viață? Există oare ceva „apropiat de viață" pe care am putea să-l descoperim în norii întunecați ai lui Titan?

Pe scurt, am putea construi un fel de indicator al vieții care să analizeze mostre din atmosfera plină de compuși organici a lui Titan și să ne furnizeze niște cifre? Închipuiți-vă că, în viitor, o echipă de cercetători pleacă în misiune și, la finalul ei, anunță: „Pe parcursul a 4,5 miliarde de ani, smogul de pe Titan a reușit să se apropie de viață în proporție de 87,3%". Sau poate o afirmație de genul: „Titan a reușit să parcurgă doar 4% din călătoria lungă de la componente organice de bază la o celulă vie simplă".

Afirmațiile acestea sună ridicol. Dar de ce?

Bineînțeles, nu dispunem de un indicator al vieții. Mai exact, nu e foarte clar nici măcar cum ar trebui să funcționeze un astfel de aparat. Ce ar măsura, de fapt? Richard Dawkins a folosit o metaforă grăitoare când a explicat procesul evoluției biologice: „muntele improbabilității".[5] Viața complexă e a priori extrem de improbabilă. Ea există numai pentru că, începând de la cele mai simple organisme microbiene, evoluția prin selecție naturală a modelat-o pe parcursul unor perioade imense de timp. În carul metaforei, strămoșii formelor complexe de viață din ziua de azi (cum ar fi oamenii) urcă tot mai

Scanned with OKEN Scanner

sus pe coasta muntelui (din punctul de vedere al complexității) pe parcursul a miliarde de ani. Bun. Dar cum rămâne cu primul pas, transformarea non-vieții în viață, drumul de la o aglomerare de elemente chimice simple la celula vie primitivă? Să fi avut loc și în acest caz un urcuș pe o variantă prebiotică și chimică a muntelui improbabilității? Se pare că da. Trecerea de la un amestec aleatoriu de molecule simple la un organism complet funcțional nu a avut loc, bineînțeles, printr-un singur salt chimic uriaș și uimitor. Trebuie să fi fost o călătorie lungă, realizată cu pași intermediari. Nimeni nu știe care au fost acești pași (poate cu excepția primelor etape; vezi pagina 209). Adevărul e că nu știm să răspundem la o întrebare mult mai fundamentală: oare trecerea de la non-viață la viață a parcurs un drum lung și lin de la materia neînsufletită la biologie sau a presupus o serie de transformări majore abrupte, asemănătoare cu tranzițiile de fază din fizică (de pildă transformarea apei în abur)? Nimeni nu știe. În orice caz, metafora muntelui prebiotic al improbabilității e utilă: înălțimea muntelui reprezintă scara complexității chimice. Revenind la ipoteticul indicator al vieții pe care l-am trimite pe Titan, acesta ar putea fi considerat un altimetru al complexității capabil să măsoare la ce altitudine a urcat atmosfera lui Titan pe muntele improbabilității.

E limpede că ceva lipsește din această poveste centrată doar asupra complexității chimice. Un șoarece mort de curând e la fel de complex din punct de vedere chimic precum unul viu, dar nu am spune despre el că e, să zicem, viu în proporție de 99,9%. E pur și simplu mort.* Și cum rămâne cu microbii iactivi (care, de fapt, nu sunt morți) precum bacteriile care, în condiții potrivnice, formează spori și rămân inerte până când întâlnesc circumstanțe mai bune și se „activează“ din nou? Sau

* Aceasta e o simplificare: diferite organe mor în ritm diferit, iar bacteriile care trăiesc în șoarece pot supraviețui la nesfârșit.

Scanned with OKEN Scanner

cu micuţele animale cu opt picioare numite tardigrade, care, când sunt răcite la temperatura la care heliul devine lichid, devin pur şi simplu inactive, dar îşi reiau activitatea când sunt încălzite din nou? Bineînţeles, chiar şi aceste organisme rezistente au viabilitate limitată. Oare un indicator al vieţii ne-ar putea spune care e punctul în care o bacterie sau o tardigradă a depăşit limita dincolo de care „nu se mai trezeşte"?

Întrebarea nu e doar filozofică. Saturn mai are un satelit natural îngheţat ce a trezit interes în ultimii ani. Este vorba despre Enceladus, corp care e încălzit din interior prin mişcările constante ale miezului său solid, mişcări produse de orbita descrisă de acest satelit în jurul uriaşei planete. Prin urmare, deşi Enceladus e departe de Soare şi are o suprafaţă îngheţată, sub scoarţa sa se află un ocean lichid. Însă scoarţa nu e perfect intactă. *Cassini* a descoperit că Enecladus elimină materie în spaţiu printr-o serie de fisuri gigantice în calotă, iar printre substanţele emanate se află molecule organice. Sunt ele un semn al vieţii care se ascunde sub suprafaţa îngheţată? Cum ne-am putea da seama?

NASA plănuieşte o misiune care să zboare prin vaporii de apă expulzaţi de Enceladus începând cu anul 2020, cu scopul de a căuta urme de activitate biologică. Dar se pune următoarea problemă presantă: ce instrumente ar trebui să existe pe această sondă şi ce ar trebui să caute? Putem proiecta un indicator al vieţii pe care să-l trimitem acolo? Chiar dacă nu putem măsura cu exactitate „gradul în care ceva e viu", ar putea, oare, un instrument să facă cel puţin diferenţa între „departe de a fi viu", „aproape viu", „viu" şi „cândva viu, dar acum mort"? Oare întrebarea are măcar sens în această formă?

Dificultatea pe care o întâmpinăm în cazul indicatorului vieţii ne trimite către o problemă mai amplă. Există un mare entuziasm legat de posibilitatea de a studia suficient de amănunţit atmosfera planetelor din afara sistemului solar pentru a descoperi semne de viaţă. Dar care ar fi o dovadă convingă-

Scanned with OKEN Scanner

toare? Unii astrobiologi consideră că răspunsul ar fi oxigenul din atmosferă, pentru că ar sugera existența fotosintezei. Alții consideră că un indiciu ar fi metanul sau un amestec format din cele două gaze. Adevărul e că nu există un consens, pentru că toate gazele comune pot fi produse și prin mecanisme non-biologice.

O lecție salutară despre pericolele definirii anticipate a vieții am învățat-o cu toții în 1976, când două nave spațiale ale NASA, numite *Viking*, au asolizat pe Marte. A fost prima și ultima oară când agenția spațială americană a încercat să realizeze experimente biologice pe o altă planetă în loc să verifice în prealabil dacă există măcar *condiții* propice vieții. Unul dintre experimentele *Viking* de detectare a vieții a fost conceput de inginerul Gilbert Levin, care acum e profesor la Universitatea de Stat din Arizona. Procedura presupunea turnarea unui mediu ce conținea substanțe nutritive pe o porțiune de sol marțian pentru a verifica dacă lichidul este consumat de eventualii microbi care trăiesc acolo și apoi transformat în dioxid de carbon rezidual. Carbonul din lichid era radioactiv, astfel încât să se poată detecta producerea de dioxid de carbon, ceea ce s-a și întâmplat. Mai mult, când mostra a fost supusă unor temperaturi ridicate, reacția s-a oprit, ca și cum microbii marțieni ar fi fost uciși de căldură. Aceleași rezultate le-au obținut ambele sonde *Viking* în locuri diferite de pe Marte și în urma repetării aceluiași experiment. Gil încă susține că a detectat viață pe Marte și că istoria îi va da, în cele din urmă, dreptate. Comunicatul oficial al NASA, pe de altă parte, spune că cele două sonde spațiale *nu* au găsit viață și că rezultatele experimentului lui Gil s-au datorat condițiilor neobișnuite ale solului. Probabil că acesta e motivul pentru care agenția n-a mai simțit nevoia să repete experimentul.

Acest dezacord profund dintre NASA și unul dintre oamenii săi de știință implicați în misiune arată cât de greu este, în practică, să stabilim dacă există sau nu viață pe o altă planetă

Scanned with OKEN Scanner

bazându-ne doar pe chimie. *Viking* era conceput să caute urme chimice ale vieţii aşa cum o ştim noi. Dacă am avea cum să fim siguri că viaţa terestră e singurul tip de viaţă posibil, am putea concepe echipamente care să detecteze molecule organice suficient de complexe încât să fie produse numai de biologia cunoscută. Dacă aparatele ar descoperi, de exemplu, un ribozom (o maşinărie moleculară necesară pentru crearea proteinelor), biologii ar fi convinşi că mostra fie e vie în momentul de faţă, fie a fost vie în trecutul apropiat. Dar cum rămâne cu moleculele mai simple folosite de viaţa terestră, precum aminoacizii? Nu-i destul: unii meteoriţi conţin aminoacizi formaţi în spaţiu fără necesitatea unor procese biologice. De curând, s-a descoperit glicoaldehidă într-un nor de gaz de lângă o stea aflată la 400 de ani-lumină de Pământ, dar această substanţă zaharoasă nu e nici pe departe un semn concludent de viaţă, pentru că astfel de molecule pot apărea şi prin procese chimice simple. Prin urmare, putem stabili *intervalul* complexităţii chimice, dar care e punctul din şirul molecular ce se desfăşoară de la aminoacizi şi zaharuri la ribozomi şi proteine în care putem afirma *cu certitudine* că viaţa a avut un cuvânt de spus? E măcar posibil să identificăm viaţa *strict pe baza amprentei sale chimice*?* Mulţi oameni de ştiinţă preferă să conceapă viaţa ca pe un *proces*, nu ca pe un lucru, poate ca pe un proces care are sens numai la scară planetară.[6] (Vezi caseta 12 din capitolul 6.)

Povestea vechii molecule

O anumită formă de viaţă a existat pe Pământ vreme de aproximativ patru miliarde de ani. În acea perioadă erau bombardamente cauzate de asteroizi şi comete, erupţii vulcanice extrem

* Lee Cronin de la Universitatea din Glasgow a propus o metodă de măsurare a complexităţii moleculare bazată pe numărul de paşi necesari pentru producerea unei molecule mari.

Scanned with OKEN Scanner

de intense, glaciațiuni globale și un soare care încălzește inexorabil. Însă viața, sub o formă sau alta, a înflorit. Firul roșu al poveștii vieții de pe Pământ (în cazul de față, literalmente) e reprezentat de o moleculă lungă numită ADN, descoperită în 1869 de către chimistul elvețian Friedrich Miescher. Provenind din cuvântul latinesc *moles*, termenul „moleculă" a început să fie folosit în Franța secolului al XVIII-lea cu sensul de „masă extrem de mică". Însă ADN-ul nu e deloc mic. Fiecare celulă din corpul nostru conține aproape doi metri de ADN: e o moleculă de-a dreptul uriașă. Faimoasa sa structură elicoidală cuprinde manualul de instrucțiuni pentru viață. Rețeta de bază e aceeași pentru toate formele de viață cunoscute. Împărtășim 98% din genele noastre cu cimpanzeii, 85% cu șoarecii, 60% cu găinile și peste jumătate cu numeroase bacterii.

CASETA 2: MECANISMUL FUNDAMENTAL AL VIEȚII

Baza informațională a tuturor formelor de viață de pe Pământ este codul genetic universal. Informațiile necesare pentru a construi o proteină sunt stocate în segmentele de ADN sub forma unei secvențe de „litere": A, C, G, T. Literele reprezintă moleculele adenozină, citozină, guanină și timină, cunoscute sub denumirea colectivă de baze, și pot fi aranjate în orice ordine de-a lungul moleculei de ADN. Diferite combinații creează proteine diferite. Proteinele sunt făcute dintr-un alt tip de molecule, numite aminoacizi. O proteină tipică e formată din sute de aminoacizi legați la capete, formând un lanț. Există mulți aminoacizi, dar viața folosește doar un set de 20 (uneori 21). Proprietățile chimice ale unei proteine depind de secvența de aminoacizi. Pentru că există numai patru baze pentru 20 de aminoacizi, ADN-ul nu poate folosi o singură bază pentru fiecare aminoacid. În schimb, folosește grupări de trei baze. Există 64 de combinații posibile de triplete (sau codoni) care se pot forma cu ajutorul celor patru litere (de exemplu, ACT, GCA...). Cele 64 de combinații sunt mai mult decât suficiente pentru 20 de aminoacizi, astfel încât există o anumită redundanță: mulți aminoacizi sunt specificați prin doi sau mai mulți codoni. Câțiva codoni sunt folosiți ca „semne de punctuație" (de exemplu, pe post de „punct").

Scanned with OKEN Scanner

Ca să „citească" instrucțiunile de construire a unei proteine, celula transcrie mai întâi secvența relevantă de codoni din ADN într-o moleculă asociată numită ARN mesager. Proteinele sunt asamblate de ribozomi, mici mecanisme care citesc secvența de codoni din ARN-ul mesager și sintetizează proteina pas cu pas, stabilind legăturile chimice dintre aminoacizi. Fiecare codon trebuie să primească aminoacidul corespunzător pentru ca sistemul să funcționeze corect. Precizia e determinată de un alt tip de ARN (ARN de transfer, sau ARNt). Există 20 de tipuri de astfel de catene scurte de ARN, fiecare dintre ele capabilă să recunoască un codon specific și să se lege de el. E esențial ca de acest ARN de transfer să se lege aminoacidul potrivit codonului care îi scrie codul. Aminoacidul este apoi adăugat în lanțul tot mai mare de aminoacizi care va forma proteina funcțională când ribozomul își încheie activitatea. Pentru ca toate aceste procese să funcționeze, trebuia ca de ARN-ul de transfer să se lege aminoacidul corespunzător. Acest pas are loc grație unei proteine speciale care poartă numele intimidant de aminoacil-ARNt sintetază. Numele nu e important. Important e că forma acestei proteine e specifică atât pentru ARNt, cât și pentru aminoacidul corespunzător, astfel încât să-l poată atașa pe acesta din urmă de varietatea potrivită de ARNt. Cum există 20 de aminoacizi diferiți, trebuie să existe 20 de aminoacil-ARNt sintetaze. Observăm că aminoacil-ARNt sintetaza e legătura crucială din catena de informații. Informațiile biologice sunt stocate într-un anumit tip de moleculă (ADN-ul, un acid nucleic, care folosește un cod triplet format dintr-un alfabet care pune la dispoziție patru litere), dar sunt menite unei clase complet diferite de molecule (proteinele, care folosesc un alfabet compus din 20 de litere). Cele două tipuri de molecule vorbesc limbi diferite! Dar aminoacil-ARNt sintetazele sunt bilingve: recunosc și codonii, și cele 20 de varietăți de aminoacizi. Prin urmare, aceste molecule de legătură sunt absolut esențiale pentru mecanismul genetic universal pe care îl folosesc toate formele de viață cunoscute. Astfel, trebuie să fie străvechi și să funcționeze foarte bine. Toate formele de viață depind de bunul lor mers! Experimentele arată că sunt, într-adevăr, extrem de eficiente, făcând greșeli (adică încurcând traducerea) în doar un caz din 3.000. E greu să nu fim frapați de *ingeniozitatea* întregului mecanism și să nu fim uluiți că a rămas intact și neschimbat vreme de miliarde de ani.

Scanned with OKEN Scanner

Faptul că toate formele cunoscute de viață urmează un scenariu universal sugerează că acestea au o origine comună. Cele mai vechi urme de viață de pe Pământ datează de acum cel puțin 3,5 miliarde de ani și se crede că unele fragmente de ADN au rămas în mare parte neschimbate în tot acest timp. Tot neschimbat e și limbajul vieții. Regulamentul ADN-ului e scris sub formă de cod, folosind doar literele A, C, G și T pentru cele patru baze nucleice care, odată prinse unele de altele, formează structura vechii molecule.* Secvența de baze, odată decodată, indică rețeta de construire a proteinelor, caii de povară ai biologiei. ADN-ul uman codează aproximativ 20.000 de proteine. Chiar dacă organismele pot avea proteine diferite, toate au în comun aceeași schemă de codare și decodare (mai multe amănunte găsiți în caseta 2). Proteinele sunt formate din catene de aminoacizi lipite între ele. O proteină tipică e formată dintr-un lanț de câteva sute de aminoacizi, împăturit într-o formă tridimensională complexă (forma sa funcțională). Viața folosește 20 (uneori 21) de varietăți de aminoacizi în diferite combinații. Există nenumărate moduri în care secvențele de baze A, C, G și T pot coda 20 de aminoacizi, dar toate formele de viață cunoscute folosesc *aceleași* asocieri (vezi tabelul 1), ceea ce ne spune că este vorba despre o trăsătură a vieții de pe Pământ străveche și adânc înrădăcinată, fiind prezentă într-un strămoș comun ce a trăit cu miliarde de ani în urmă.**

Cu toate că ADN-ul e foarte vechi, există alte entități mult mai vechi: de exemplu, cristalele. În Australia și Canada există zircon cu vârste de peste patru miliarde de ani, care a supraviețuit etapelor de subducție în scoarța Pământului. Diferența

---

* Când informațiile din ADN sunt transcrise în ARN, T e înlocuit cu o moleculă ușor diferită: U, adică uracil.

** O observație ce ține de terminologie: oamenii de știință provoacă multă confuzie când vorbesc despre „codul" unui organism, dar înțeleg prin asta date genetice codate. Datele tale genetice sunt diferite de ale mele, însă avem același cod genetic.

Scanned with OKEN Scanner

cea mai importantă este aceea că un organism viu nu e în echilibru cu mediul său. De fapt, viața e în general foarte *departe* de echilibru. Pentru a continua să funcționeze, un organism trebuie să ia energie din mediu (de exemplu, din lumina solară sau din consumul de hrană) și să elimine ceva în mediu (de exemplu, oxigen sau dioxid de carbon). Prin urmare, există un schimb continuu de energie și materie cu mediul înconjurător, în vreme ce un cristal e inert pe dinăuntru. După ce moare, organismul încetează orice activitate și alunecă ușor spre echilibru pe măsură ce se descompune.

TABELUL 1: CODUL GENETIC UNIVERSAL

	T		C		A		G	
T	TTT	Fe	TCT	Ser	TAT	Tyr	TGT	Cys
	TTC		TCC		TAC		TGC	
	TTA	Leu	TCA		TAA	STOP	TGA	STOP
	TTG		TCG		TAG		TGG	Trp
C	CTT	Leu	CCT	Pro	CAT	His	CGT	Arg
	CTC		CCC		CAC		CGC	
	CTA		CCA		CCA	Gln	CGA	
	CTG		CCG		CAG		CGG	
A	ATT	Ile	ACT	Tr	AAT	Asn	AGT	Ser
	ATC		ACC		AAC		AGC	
	ATA		ACA		AAA	Lys	AGA	Arg
	ATG	Met	ACG		AAG		AGG	
G	GTT	Val	GCT	Ala	GAT	Asp	GGT	Gli
	GTC		GCC		GAC		GGC	
	GTA		GCA		GAA	Glu	GGA	
	GTG		GCG		GAG		GGG	

Scanned with OKEN Scanner

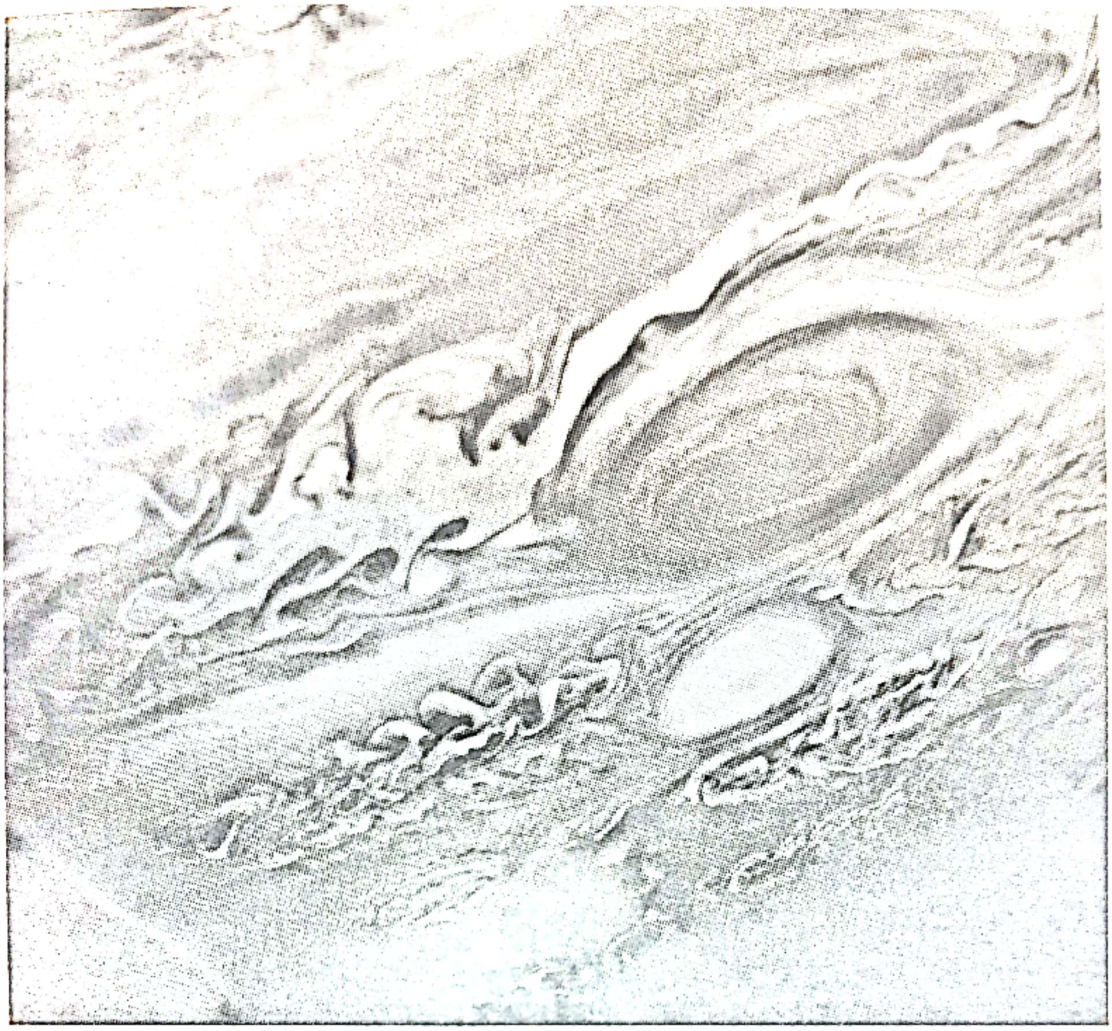


Figura 1 Marea Pată Roșie a lui Jupiter.

Tabelul arată codurile folosite de toate formele de viață cunoscute. Aminoacizii pe care tripletele de litere (codonii) le codează sunt trecuți în listă în dreapta codonilor sub formă de prescurtări (de ex. Fe = fenilalanină; numele acestor molecule nu sunt importante pentru ce mi-am propus aici). O curiozitate istorică: existența unei forme de cod genetic a fost sugerată pentru prima oară într-o scrisoare din 8 iulie 1953 adresată lui Crick și Watson de către un cosmolog, George Gamow, cunoscut mai bine pentru cercetările sale deschizătoare de drumuri în domeniul Big Bangului.

Există, fără îndoială, sisteme lipsite de viață care se află și ele departe de echilibru și au, în același timp, o vechime mare.

Scanned with OKEN Scanner

Figura 2 „Structură disipativă" chimică. Când un amestec chimic e scos din starea de echilibru, poate produce spontan forme stabile de genul celor din imagine. Chimistul Ilya Prigogine susținea că astfel de sisteme reprezintă primii pași din lungul drum către viață.

Exemplul meu favorit e Marea Pată Roșie de pe Jupiter, un vârtej gazos a cărui existență continuă de când planeta a fost observată pentru prima oară prin telescop și nu dă semne că va înceta prea curând (vezi figura 1).

Se cunosc multe alte exemple de sisteme chimice sau fizice cu existență autonomă similară. Unul dintre ele este reprezentat de celulele de convecție, unde un lichid (de pildă apa) descrie mișcări ascendente și descendente conform unui tipar sistematic atunci când e încălzit de dedesubt. Mai există și

Scanned with OKEN Scanner

reacții chimice care generează forme spiralate sau pulsează ritmic (figura 2). Astfel de sisteme care manifestă spontan aparența de complexitate organizată au fost numite „structuri disipative" de către chimistul Ilya Prigogine, care susținea studiul acestora în anii '70. Prigogine era de părere că structurile disipative chimice care operează departe de starea de echilibru și susțin un flux constant de materie și energie reprezintă un fel de etapă aflată pe drumul lung către viață. Mulți oameni de știință încă sunt de această părere.

În organismele vii, proteinele sunt cele care se ocupă de cea mai mare parte a activității chimice. Metabolismul (fluxul de energie și de materie prin organisme) e necesar pentru ca viața să poată funcționa, iar proteinele își au propriul rol în procesul metabolic. Dacă viața a început (așa cum credea Prigogine) prin cicluri chimice elaborate și dependente de energie, atunci proteinele trebuie să fi fost primii actori din marea piesă de teatru a vieții. Însă, de unele singure, proteinele sunt în general inutile. *Organizarea* atât de importantă a vieții are nevoie de multă coregrafie, adică de un aranjament de tipul stăpânește-și-controlează. Acest rol e îndeplinit de acizii nucleici (ADN și ARN). Viața implică un pact încheiat între cele două clase diferite de molecule: acizii nucleici și proteinele. Pentru mulți oameni de știință, dilema legată de natura vieții este de tipul „găina sau oul": nu poți să ai una fără s-o ai și pe cealaltă. Fără o armată de proteine care să se agite în jurul său, molecula de ADN rămâne împotmolită. În termeni mai simpli, atribuțiile sunt după cum urmează: acizii nucleici stochează detalii despre „planul vieții", iar proteinele fac posibilă funcționarea organismului. E nevoie de *ambele* elemente, prin urmare o definiție a vieții trebuie să țină cont de acest lucru. Trebuie să ia în calcul nu doar chimia organizată și complexă creatoare de tipare, ci și chimia *supravegheată* sau *informată*, pe scurt, chimia plus *informația*.

Scanned with OKEN Scanner

Viața = materie + informație

Nimic din biologie nu are sens decât în lumina informației.
—Bernd-Olaf Küppers[7]

Am ajuns într-un punct critic. Lucrul care separă viața de non-viață este *informația*. Deși e ușor de rostit, această afirmație trebuie dezvoltată. Să începem cu ceva simplu: organismele se reproduc și, prin acest proces, transmit urmașilor informații despre propria formă. Din acest punct de vedere, reproducerea nu e același lucru cu producția. Când se reproduc, câinii fac mai mulți câini; pisicile fac pisici, oamenii fac oameni. Planul de bază al corpului trece de la o generație la alta. Însă reproducerea e mai nuanțată decât simpla perpetuare a speciei. Bebelușii, de pildă, moștenesc unele trăsături caracteristice ale părinților sau bunicilor (păr roșu, ochi albaștri, pistrui, picioare lungi). Cel mai bun mod de a exprima moștenirea e să spunem că *informația* despre generațiile anterioare a trecut la următoarea: informația necesară construirii unui nou organism asemănător celui vechi. Informația e codată în genele organismului, care sunt replicate în cadrul procesului de reproducere. Prin urmare, esența reproducerii biologice este replicarea *informației ce poate fi moștenită.*

Când Schrödinger și-a ținut prelegerile în 1943, oamenii de știință nu știau multe lucruri despre felul în care informația genetică este copiată și transmisă mai departe. Nimeni nu știa, de fapt, unde e stocată această informație sau cum e replicată. Asta se întâmpla cu un deceniu înainte de descoperirea rolului ADN-ului în genetică. Marele merit al lui Schrödinger a fost faptul că a așezat stocarea, procesarea și transmiterea informației la nivel *molecular*, la scară nano, în interiorul celulelor vii.* Mai mult, era nevoie de mecanica cuantică (invenția lui Schrö-

* Un nanometru este a miliarda parte dintr-un metru. „Nanotehnologia" se referă la structuri concepute la această scară moleculară.

Scanned with OKEN Scanner

dinger) pentru a explica stabilitatea stocării de informație. Deși materialul genetic nu era cunoscut, Schrödinger a concluzionat că la mijloc trebuie să se afle o moleculă cu o structură diferită, pe care a numit-o „cristal aperiodic". Era o propunere destul de logică. Un cristal are stabilitate. Însă cristalele cunoscute, precum diamantele sau sarea, sunt periodice: rețele de atomi simple și regulate. De cealaltă parte, o moleculă cu niveluri de stabilitate precum cele ale cristalelor care putea fi structurată *arbitrar* putea să codeze și să stocheze o cantitate foarte mare de informație. Și exact asta s-a dovedit a fi ADN-ul: un cristal aperiodic. Atât Crick, cât și Watson (care au descoperit structura ADN-ului un deceniu mai târziu) au recunoscut că în cartea lui Schrödinger găsiseră ideile esențiale care îi stimulaseră să elucideze forma și funcția materialului genetic.

Astăzi, baza informațională a vieții a pătruns în fiecare domeniu al științei. Biologii spun că genele (secvențe de baze din catena de ADN) conțin „instrucțiuni codate" care sunt „transcrise" și „traduse". Când genele sunt replicate, informația e întâi copiată și apoi verificată pentru a se identifica posibilele erori. Dacă e nevoie, erorile sunt corectate. La nivelul țesuturilor, o serie de molecule de „semnalizare" comunică informația între celulele învecinate. Alte molecule circulă în sânge, trimițând semnale între organe. Chiar și celulele strâng informații despre mediul lor înconjurător, le procesează în interior și reacționează în consecință. În biologie, principalul sistem de procesare a informației este, bineînțeles, creierul, comparat deseori (nu foarte convingător) cu un computer digital. Iar dincolo de organismele individuale se află structurile sociale și ecosistemele. Insectele sociale (cum sunt furnicile și albinele) fac transfer de informații astfel încât să-și poată coordona activitățile de grup precum căutarea hranei și alegerea locului în care să construiască un cuib. Păsările se adună în stoluri, iar peștii în bancuri: schimbul de informație se află la baza

Scanned with OKEN Scanner

comportamentului lor coordonat. Primatele se organizează în colonii cu norme sociale complexe susținute de multe forme subtile de comunicare. Societatea umană a creat sisteme de procesare a informației cu acoperire globală, precum World Wide Web. Prin urmare, nu ne surprinde faptul că mulți oameni de știință aleg acum să *definească* viața în baza proprietăților ei informaționale. Biofizicianul Eric Smith o consideră „un sistem chimic în care fluxul și stocarea energiei sunt asociate cu fluxul și stocarea de informație“[8].

Am ajuns acum în punctul de întâlnire al tărâmurilor biologiei și fizicii sau vieții și non-vieții. Deși Schrödinger a indicat corect existența unei legături între structura moleculară și stocarea informației, cristalul aperiodic pe care l-a propus a trecut cu vederea o prăpastie conceptuală uriașă. O moleculă e o structură fizică; informația, în schimb, e un concept abstract, care derivă, până la urmă, din lumea comunicării omenești. Cum putem construi o punte trainică peste prăpastie? Cum putem lega informația abstractă de fizica moleculelor? Primele tentative de răspuns au venit, din întâmplare, în urmă cu 150 de ani în plin proces al dezvoltării revoluției industriale și dintr-un domeniu care nu avea de-a face cu biologia, ci mai mult cu lumea ingineriei mecanice.

Scanned with OKEN Scanner

2. DEMONUL INTRĂ ÎN SCENĂ

Oare mecanismele vieţii sunt demoni ai lui Maxwell,
ce nasc ordine din haos? —Peter Hoffman[1]

În decembrie 1867, fizicianul scoţian James Clerk Maxwell i-a scris o scrisoare prietenului său Peter Guthrie Tait. Deşi pur speculativă, scrisoarea conţinea şi o bombă a cărei undă de şoc încă e resimţită un secol şi jumătate mai târziu. Sursa tulburării era o fiinţă imaginară, „o fiinţă cu o minte atât de ageră că poate urmări traseul fiecărei molecule". Folosindu-se de un argument simplu, Maxwell a tras concluzia că această entitate liliputană, la scurt timp după aceea numită *demon*, „ar fi în stare să facă lucruri care nouă ne sunt imposibile". La prima vedere, demonul putea face vrăji, era în stare să producă ordine din haos şi să articuleze o posibilă legătură între lumea abstractă a informaţiei şi cea fizică a moleculelor.

Trebuie să subliniem faptul că Maxwell a avut o minte sclipitoare, putând fi comparat cu Newton şi cu Einstein. În anii 1850, Maxwell a unit legile electromagnetismului şi a prezis existenţa undelor radio. A fost totodată pionier al fotografiei color şi a explicat existenţa inelelor lui Saturn. În plus, a avut contribuţii importante la teoria căldurii, calculând cum, într-un gaz aflat la o temperatură dată, căldura sub formă de energie e distribuită între toate moleculele aflate într-o mişcare haotică.

Demonul lui Maxwell era un paradox, o enigmă, un afront la adresa legilor ordonate ale universului. A deschis o cutie a Pandorei plină de întrebări referitoare la natura ordinii şi a

Scanned with OKEN Scanner

haosului, a creşterii şi descompunerii, a sensului şi scopului. Şi, cu toate că Maxwell era fizician, s-a dovedit că cea mai influentă aplicare a ideii demonului nu a fost în domeniul fizicii, ci în cel al biologiei. Acum ştim că magia demonică a lui Maxwell ne poate ajuta să explicăm magia vieţii. Însă această aplicare va trebui să mai aştepte o perioadă îndelungată. La început, demonul nu era menit să răspundă întrebării „Ce este viaţa?", ci unei întrebări mult mai simple şi mai practice: mai precis, ce este căldura?

Magia moleculară

Maxwell i-a scris lui Tait la apogeul revoluţiei industriale. Spre deosebire de revoluţia agricolă din Neolitic, cea industrială nu a înaintat prin încercări şi eşecuri. Mecanisme precum motorul cu aburi şi cel diesel au fost proiectate cu mare grijă de oameni de ştiinţă şi ingineri familiarizaţi cu principiile enunţate de Isaac Newton în secolul al XVII-lea. Newton descoperise legile mişcării, care corelează forţa ce acţionează asupra unui corp material cu natura mişcării acestuia, cuprinzând totul într-o formulă matematică simplă. Până în secolul al XIX-lea, era ceva obişnuit ca legile lui Newton să fie folosite în proiectarea tunelurilor şi podurilor sau pentru a anticipa comportamentul pistoanelor şi roţilor, mărimea forţei de tracţiune dezvoltate şi energia de care urmau să aibă nevoie.

La sfârşitul secolului al XIX-lea, fizica era o ştiinţă dezvoltată, iar problemele de inginerie generate de noile industrii asigurau provocări fascinante pentru fizicieni. Cheia creşterii industriale se afla, atunci ca şi cum, în energie. Cărbunele era sursa cea mai la îndemână pentru punerea în funcţiune a maşinăriilor grele, iar motoarele cu aburi erau metoda preferată de a transforma energia chimică a cărbunelui în tracţiune mecanică. Optimizarea raportului dintre energie, căldură, lucru mecanic şi deşeuri era mai mult decât un exerciţiu intelectual.

Scanned with OKEN Scanner

Profituri uriașe puteau depinde chiar și de o minimă îmbunătățire a eficienței.

Deși legile mecanicii erau bine înțelese pe atunci, natura căldurii rămânea neclară. Inginerii știau că era un fel de energie care putea fi transformată în alte forme: de exemplu, în energie mecanică (principiul aflat la baza locomotivei cu aburi). Însă folosirea căldurii pentru realizarea unui lucru mecanic util s-a dovedit că implică mai mult decât o simplă trecere la forme de energie diferite. Dacă am avea acces nelimitat la toată energia căldurii, lumea ar fi un loc foarte diferit, întrucât căldura e o sursă de energie extrem de abundentă în univers.* Exploatarea nerestricționată a energiei presupuse de căldură ar permite, de exemplu, unei nave spațiale să fie propulsată numai de resturile energiei termice a Big Bangului. Sau, revenind pe Pământ, toate industriile noastre ar putea funcționa numai pe bază de apă: într-o sticlă de apă e suficientă energie încât să-mi luminez sufrageria timp de o oră. Imaginează-ți că ai naviga pe mare fără alt combustibil în afară de căldura oceanului.

Din păcate, așa ceva nu se poate realiza. Fizicienii au descoperit în anii 1860 o limită strictă a cantității de căldură ce poate fi transformată în activitate mecanică utilă. Constrângerea provine din faptul că *fluxul* de căldură, și nu energia în sine, poate efectua lucru mecanic. Pentru a folosi energia din căldură trebuie să existe undeva o *diferență* de temperatură. Un exemplu simplu: dacă un rezervor cu apă caldă e așezat lângă unul cu apă rece, un motor pe bază de căldură conectat la ambele rezervoare poate funcționa pe baza gradientului de temperatură și poate îndeplini o sarcină fizică precum întoarcerea unei manivele sau ridicarea unei greutăți. Motorul va

---

* Ignor aici masa-energia materiei, care în mare parte e inertă, și misterioasa energie întunecată a spațiului gol. Acestea există într-o măsură mult mai mare.

Scanned with OKEN Scanner

lua căldură din apa fierbinte și o va transfera apei reci, în acest proces extrăgând o cantitate de energie utilă. Dar, pe măsură ce căldura e transferată din rezervorul fierbinte în cel rece, apa fierbinte se va răci, iar apa rece se va încălzi, până când diferența de temperatură dintre cele două scade până acolo încât motorul se oprește. Care e scenariul cel mai bun? Răspunsul depinde de temperatura rezervoarelor. Dacă un rezervor e menținut (cu ajutorul unui echipament extern) la punctul de fierbere (100°C) și celălalt la punctul de îngheț (0°C), atunci se dovedește că, în cel mai bun caz (chiar dacă nu ar exista vreo pierdere de căldură care se disipează în împrejurimi), s-ar putea extrage cam 27% din energie sub forma lucrului mecanic util. Nici un inginer din univers nu ar putea obține un rezultat mai bun; e o lege fundamentală a naturii.

După ce fizicienii și-au dat seama de asta, a apărut știința cunoscută sub numele de termodinamică. Legea care spune că nu putem transforma toată căldura în lucru mecanic e al doilea principiu al termodinamicii.* Aceeași lege explică situația familiară în care căldura trece de la fierbinte la rece (de exemplu aburul se transformă în gheață), și nu în sens invers. Acestea fiind spuse, căldura *poate* trece de la rece la cald dacă se disipă o energie oarecare. Funcționarea în sens invers a unui motor termic (*consumarea* energiei pentru a pompa căldură de la rece la cald) se află la baza frigiderului, una dintre cele mai folositoare invenții ale revoluției industriale, pentru că ne permite să înghețăm carnea și s-o transportăm pe distanțe de mii de kilometri.

Ca să înțelegem cum se potrivește demonul lui Maxwell în acest peisaj, să ne imaginăm o cutie rigidă care conține un gaz mai fierbinte la un capăt decât la celălalt. La nivel micro, căldura nu e altceva decât energia mișcării: agitația nesfârșită a

* Primul principiu al termodinamicii nu e decât legea de conservare a energiei când căldura e inclusă ca formă de energie.

Scanned with OKEN Scanner

moleculelor. Cu cât e mai fierbinte sistemul, cu atât moleculele se mişcă mai repede: la capătul fierbinte al cutiei, moleculele de gaz se mişcă, în medie, mai repede decât la capătul mai rece. Când moleculele mai rapide se ciocnesc de cele mai lente, vor transfera (din nou, în medie) o cantitate de energie cinetică moleculelor de gaz mai reci, crescând astfel temperatura gazului. După o vreme, sistemul va ajunge la echilibru termic, oprindu-se la o temperatură uniformă aflată undeva între cele două extreme de la capetele gazului. A doua lege a termodinamicii împiedică derularea procesului în sens invers: adică situaţia în care gazul îşi rearanjează moleculele astfel încât cele rapide să se adune într-un capăt al cutiei, iar cele lente în partea cealaltă. Dacă am vedea aşa ceva, am spune că e un miracol.

Cu toate că e uşor de înţeles în contextul cutiilor umplute cu gaz, a doua lege a termodinamicii e valabilă în cazul tuturor sistemelor fizice şi chiar la nivelul întregului cosmos. Aceasta este legea care îi conferă universului o direcţie temporală (vezi caseta 3). În forma ei cea mai generală, a doua lege e cel mai bine înţeleasă folosind o cantitate numită *entropie*. Pe parcursul acestei cărţi, am să tot revin la entropie şi la diferitele feluri în care a fost înţeleasă, dar, deocamdată, o putem considera o măsură a dezordinii dintr-un sistem. Căldura, de exemplu, reprezintă entropie pentru că descrie agitaţia haotică a moleculelor. Când e generată căldură, entropia creşte. Dacă entropia unui sistem pare să scadă, nu trebuie decât să privim imaginea de ansamblu şi să descoperim că ea creşte în altă parte. De exemplu entropia dintr-un frigider scade, dar căldura care iese prin spatele lui creşte entropia bucătăriei. Pe lângă asta, există şi facturile la curent. Electricitatea trebuie generată, iar procesul de generare a acesteia creează căldură şi creşte entropia centralei. Dacă ne uităm cu atenţie, entropia câştigă întotdeauna.

Scanned with OKEN Scanner

La nivel cosmic, a doua lege presupune faptul că *entropia universului nu scade niciodată.**

CASETA 3: ENTROPIA ȘI SĂGEATA TIMPULUI

Să ne închipuim că avem în față filmul unei întâmplări cotidiene. Dacă îl derulăm în sens invers, cei aflați de față cu noi încep să râdă, pentru că văd ceva ridicol. Pentru a descrie această săgeată universală a timpului, fizicienii apelează la un concept numit *entropie*. Acest termen are multe întrebuințări și definiții, fapt care poate crea confuzie, însă cel mai convenabil pentru noi e să-l considerăm drept unitatea de măsură a *dezordinii* dintr-un sistem cu multe componente. Pentru a da un exemplu obișnuit, să ne imaginăm că deschidem un pachet nou de cărți de joc aranjate în ordine numerică. Dacă le amestecăm, cărțile devin mai puțin ordonate. Entropia cuantifică această transformare prin enumerarea modalităților în care sistemele formate din mai multe părți pot fi dezordonate. Nu există decât *o singură* modalitate prin care un pachet de cărți de joc poate prezenta ordine numerică (As, 2, 3... Valet, Damă, Rege), dar *mai multe* modalități prin care pot fi aduse într-o stare de dezordine. Această realitate simplă ne spune că amestecarea aleatorie a cărților e extrem de probabil să creeze dezordine (sau entropie), deoarece există mult mai multe moduri de a fi dezordonat decât de a fi ordonat. Acesta este însă un argument statistic. Există o probabilitate extrem de mică, dar nu egală cu zero, ca amestecul unui pachet de cărți dezordonate să le aranjeze din întâmplare în ordine crescătoare.

---

* Marele astronom britanic sir Arthur Eddington scria la un moment dat că „legea conform căreia entropia creşte mereu ocupă, cred eu, poziţia supremă printre legile naturii. Dacă cineva ţi-ar arăta că teoria ta preferată despre univers se află în contradicţie cu ecuaţiile [de câmp electromagnetic] ale lui Maxwell, atunci cu atât mai rău pentru ecuaţiile lui Maxwell. Dacă se constată că e contrazisă prin observaţii, ei bine, experimentaliştii mai dau şi ei rateuri uneori. Dar dacă se constată că teoria ta contrazice cea de-a doua lege a termodinamicii, nu-ţi mai pot da nici o speranţă; nu mai poţi face altceva decât să te scufunzi în cea mai cumplită umilinţă“ (Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World*, Cambridge University Press, 1928, p. 74).

Scanned with OKEN Scanner

Același lucru e valabil și în cazul cutiei cu gaz. Moleculele se mișcă aleatoriu, astfel încât există o probabilitate finită (o probabilitate extrem de mică, bineînțeles) ca moleculele rapide să se adune într-un capăt al cutiei, iar cele lente în partea cealaltă. Prin urmare, afirmația corectă este aceea potrivit căreia, într-un sistem închis, entropia (sau gradul de dezordine) e *extrem de probabil*, dar nu absolut sigur, să crească sau să rămână aceeași. Entropia maximă a unui gaz (starea macroscopică ce poate fi atinsă prin cel mai mare număr de aranjamente ce nu pot fi deosebite unul de altul) corespunde echilibrului termodinamic, când gazul are temperatură și densitate uniforme.

La mijlocul secolului al XIX-lea, principiile de bază ale căldurii, lucrului mecanic, entropiei și legilor termodinamicii erau bine statornicite. Exista convingerea că, în sfârșit, căldura fusese înțeleasă, proprietățile sale păstrând o legătură confortabilă cu restul fizicii. Dar apoi a apărut demonul. Printr-o conjectură simplă, Maxwell a subminat această nouă perspectivă lovind chiar la temelia celei de-a doua legi.

Iată ideea generală a sugestiei sale în scrisoarea către Tait. Am afirmat anterior că moleculele de gaz se agită neîncetat și că, cu cât gazul e mai fierbinte, cu atât se mișcă mai repede. Dar nu toate moleculele se mișcă *la fel* de repede. Într-un gaz aflat la temperatură fixă, energia e distribuită aleatoriu, și nu uniform, ceea ce înseamnă că unele molecule se mișcă mai repede decât altele. Maxwell însuși a calculat exact felul în care energia e distribuită la nivelul moleculelor: ce fracțiune are jumătate din viteza medie, de două ori cât viteza medie ș.a.m.d. Dându-și seama că și în stare de echilibru termodinamic moleculele de gaz au viteze diferite (și, prin urmare, energii diferite), lui Maxwell i-a trecut prin minte un gând neobișnuit. Să presupunem că ar fi posibil, folosind un aparat special, să separăm moleculele rapide de cele lente fără să consumăm energie. Această procedură de sortare ar crea, de fapt, o diferență de temperatură (moleculele rapide aici, iar cele lente dincolo),

Scanned with OKEN Scanner

iar un motor termic ar putea funcţiona pe baza gradientului de temperatură. Folosind această procedură, putem începe cu un gaz aflat la o temperatură uniformă şi putem transforma o parte din căldura lui în lucru mecanic fără vreo schimbare exterioară, încălcând flagrant a doua lege. De fapt, acest lucru ar inversa săgeata timpului şi ar deschide calea către un anumit tip de mişcare perpetuă.

Până acum, lucrurile sunt cât se poate de şocante. Însă înainte să regândim tot ce ştim despre natură, trebuie să ne confruntăm cu evidenta întrebare despre cum am putea separa, de fapt, moleculele rapide de cele lente. În scrisoarea sa, Maxwell a descris planul pe care-l avea pentru realizarea acestui scop. În esenţă, cutia de gaz e divizată printr-un ecran rigid în care se află un singur orificiu foarte mic (vezi figura 3). Printre nenumăratele molecule agitate care bombardează ecranul, câteva dintre ele ajung şi în dreptul orificiului. Acestea pătrund în cealaltă jumătate a cutiei; iar dacă orificiul e îndeajuns de mic, prin el va trece câte o singură moleculă. Lăsat la voia întâmplării, traficul în ambele sensuri va ajunge la o medie şi temperatura va rămâne stabilă. Dar să ne imaginăm că orificiul poate fi acoperit cu un obturator mobil. Mai mult, să presupunem că o fiinţă minusculă (un demon) se află lângă orificiu şi poate manevra obturatorul. Dacă se mişcă suficient de repede, demonul poate permite doar moleculelor cu viteză mică să treacă prin orificiu într-un sens, iar în celălalt doar moleculelor cu viteză mare. Continuând acest proces de sortare mai mult timp, demonul poate ridica temperatura dintr-o parte a ecranului, scăzând-o pe cea din cealaltă jumătate. Astfel se creează o diferenţă de temperatură fără ca, în aparenţă, să se elimine vreun fel de energie:* adică se obţine ordine din haosul molecular pe gratis.

---

* Maxwell a pornit de la permisa că demonul şi obturatorul sunt instrumente care funcţionează perfect, fără frecare şi fără să aibă nevoie

Scanned with OKEN Scanner

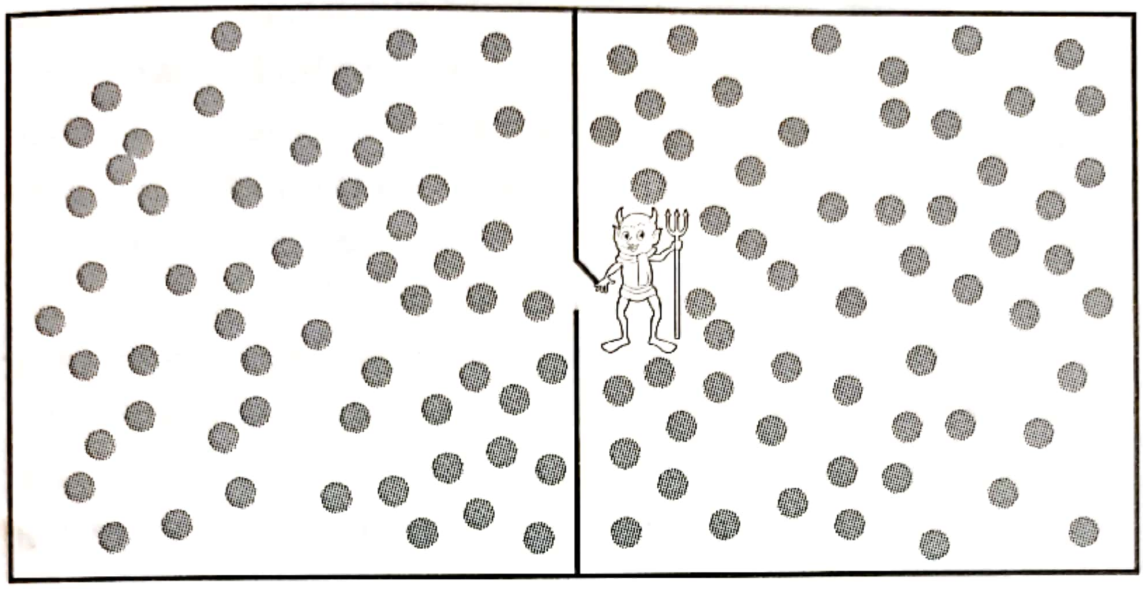


Figura 3 O cutie cu gaz e împărțită în două camere printr-un ecran prevăzut cu un mic orificiu prin care moleculele trec una câte una. Orificiul poate fi acoperit cu un obturator. Un mic demon privește moleculele aflate într-o mișcare aleatorie și operează obturatorul astfel încât moleculele rapide să treacă în camera din stânga, iar cele lente în camera din dreapta. După o perioadă, viteza medie a moleculelor din dreapta va fi semnificativ mai mare decât a celor din stânga, ceea ce înseamnă că între cele două camere s-a stabilit o diferență de temperatură. Putem obține lucru mecanic util folosind un motor acționat de gradientul de căldură. Demonul transformă așadar mișcarea moleculară dezorganizată în mișcare mecanică controlată, adică creează ordine din haos și deschide drumul către un dispozitiv de tip perpetuum mobile.

Pentru Maxwell și contemporanii săi, însăși ideea existenței unui demon manipulator care ar încălca ceea ce ar trebui să constituie o lege a naturii (faptul că entropia nu scade niciodată) părea absurdă. Era clar ceva nu fusese luat în considerare,

---

de o sursă de putere. Avem de-a face cu o idealizare, însă nu există nici un principiu care să ne împiedice să luăm în calcul apropierea de această perfecțiune mecanică. Să ne amintim că frecarea e o proprietate macroscopică în cadrul căreia mișcarea ordonată (de exemplu o minge care se rostogolește pe podea) e transformată în mișcare dezordonată (căldură), unde energia mingii e disipată la nivelul a miliarde și miliarde de particule minuscule. Dar la scară moleculară, totul e minuscul. Frecarea nu există. Mai jos, voi descrise câteva proprietăți „demonice" practice.

Scanned with OKEN Scanner

dar ce anume? Ce-ați zice de faptul că, în lumea reală, nu există demoni? Nu-i nici o problemă. Argumentul lui Maxwell intră în categoria așa-numitelor „experimente mentale", adică scenarii imaginare care descriu anumite principii științifice importante. Nu trebuie să fie sugestii practice. Există o întreagă istorie a acestor experimente mentale în fizică. Ele au condus deseori la progrese și, în cele din urmă, la conceperea unor sisteme practice. În orice caz, Maxwell nu avea nevoie de o ființă concretă care să opereze obturatorul, ci doar de un aparat la scară moleculară care să realizeze sortarea. La vremea în care i-a scris lui Tait, ideea lui Maxwell era pură fantezie; nu avea cum să știe că entități asemănătoare demonului său chiar există. De fapt, existau chiar în corpul lui! Însă descoperirea legăturii dintre demonii moleculari și viață a trebuit să mai aștepte un secol.

Între timp, în afară de prezența demonului, nimic altceva nu pare să fie nelalocul lui în argumentul lui Maxwell, iar vreme de mai multe decenii a rămas ca un adevăr neplăcut în miezul fizicii, un paradox urât pe care mulți oameni de știință au ales să-l ignore. Privind înapoi, înțelegem acum că soluția paradoxului se afla la vedere. Pentru a sorta eficient moleculele, demonul trebuie să culeagă *informații* despre viteza și direcția lor. Și se dovedește că deschiderea problemei informației în domeniul fizicii conduce către o revoluție științifică care abia astăzi începe să se manifeste.

Cum măsurăm informația

Înainte să ajungem la imaginea de ansamblu, trebuie să aprofundăm puțin conceptul de informație. Folosim acest cuvânt în mod frecvent în viața de zi cu zi, în tot felul de contexte: de la orarul autobuzelor la secrete militare. Milioane de oameni lucrează pentru companii specializate în tehnologia informației. Domeniul în plină dezvoltare al bioinformaticii atrage

Scanned with OKEN Scanner

miliarde de dolari sub formă de fonduri. Economia Statelor Unite e bazată în mare parte pe industrii specializate în informație, iar acest domeniu a devenit atât de comun în viața fiecăruia dintre noi, încât îl numim pur și simplu „IT". Însă această familiaritate ignoră unele probleme conceptuale profunde. Pentru început, ce este, mai exact, *informația*? N-o putem vedea, atinge sau mirosi, și totuși ne afectează pe toți: până la urmă, din asta trăiește California, unde se află Silicon Valley.

După cum am observat, ideea de informație provine din domeniul discursului uman. Îmi pot „informa" studenții despre notele de la examen, de pildă, sau mă poți informa cu privire la cel mai apropiat restaurant. Folosit în acest sens, e un concept pur abstract, precum patriotismul, sau oportunitatea politică, sau iubirea. Pe de altă parte, e limpede că informația joacă un rol *fizic* în lume, mai ales în biologie. O schimbare la nivelul informației stocate în ADN poate produce mutații și schimba cursul evoluției. *Informația influențează lumea.* Am putea spune că are „putere cauzală". Provocarea cu care se confruntă știința o constituie corelarea informației abstracte cu lumea concretă a obiectelor fizice.

În contextul acestor probleme profunde, dacă vrem să înaintăm trebuie, mai întâi, să venim cu o definiție precisă a informației în sensul ei pur, neîncărcat cu diverse conotații. Computerul la care scriu aceste rânduri îmi spune că partiția C poate stoca 237 gigabyți (Gb) de informație. Sistemul pretinde că poate procesa informația cu o viteză de trei gigaherți (GHz). Dacă aș vrea mai mult spațiu de stocare sau o procesare mai rapidă, ar trebui să plătesc în plus. Astfel de cifre sunt vehiculate tot timpul. Dar ce sunt gigabyții și gigaherții? (Atenție: această secțiune a cărții conține informații ce țin de matematica elementară. E singura parte care are un astfel de conținut.)

Cuantificarea informației a început cu adevărat prin eforturile inginerului Claude Shannon de la mijlocul anilor '40. O figură excentrică și oarecum retrasă, Shannon a lucrat la

Scanned with OKEN Scanner

Laboratoarele Bell din Statele Unite, unde se străduia mai ales să transmită cu precizie mesaje codate. Proiectul a început în timpul războiului: dacă ai ghinionul să folosești o stație radio afectată de interferențe sau o linie telefonică care suferă întreruperi, cum poți trimite un mesaj aproape fără vreo eroare? Shannon a început să studieze felul în care poate fi codată informația pentru a reduce la minimum riscul de a transmite un mesaj trunchiat. Momentul culminant al proiectului a venit în 1949 odată cu publicarea cărții *The Mathematical Theory of Communication*.[2] Volumul nu a atras foarte multă atenție, dar istoria va stabili faptul că a reprezentat un eveniment de cotitură în știință, care atinge chiar miezul întrebării schrödingeriene „Ce este viața?".

Primul pas pe care l-a făcut Shannon a fost să adopte o definiție riguroasă din punct de vedere matematic a informației. În primul rând, a apelat la noțiunea de incertitudine. În varianta ei simplificată, definiția spune că, atunci când obținem informație, învățăm ceva ce nu știam înainte: prin urmare, avem mai puțină incertitudine asupra unui lucru. Să luăm ca exemplu aruncarea unei monede: există șanse de 50% să cadă cap sau pajură. Cât timp nu ne uităm când aterizează, nu suntem siguri în privința rezultatului. Când ne uităm, incertitudinea e redusă (la zero, în cazul de față). Alegerile binare de genul cap și pajură sunt cele mai simple și sunt direct relevante pentru lumea informaticii, deoarece codul computerelor e formulat în termeni de aritmetică binară: din 1 și 0. Implementarea fizică a acestor simboluri necesită doar un sistem cu două stări, asemenea unui întrerupător care se află fie în poziția „pornire", fie în cea de „oprire". După apariția lucrării lui Shannon, „cifra binară" sau „bitul" a devenit unitatea de măsură a informației. Bytul, de exemplu, echivalează cu 8 biți (2^3) și este litera „b" din Gb (gigabyte, un miliard de biți). Viteza de procesare a informației se exprimă în GHz, care vine de la „giga-hertz" sau un miliard de „aruncări" pe secundă. Când ne

Scanned with OKEN Scanner

uităm la rezultatul unei monede aruncate, obținem un bit de informație prin procesul de colapsare a două stări la fel de probabile într-una singură și certă.

Dar dacă aruncăm două monede în același timp? Inspectarea rezultatului ne va oferi două unități de informație (biți). Se poate observa însă că, dacă lucrăm cu două monede, apar *patru* stări posibile: cap-cap, cap-pajură, pajură-cap, pajură-pajură. Când avem trei monede, există opt stări posibile și obținem trei biți când ne uităm la rezultat. Patru monede au șaisprezece stări și patru biți, cinci monede au treizeci și două de stări ș.a.m.d. Progresia e următoarea: $4 = 2^2$, $8 = 2^3$, $32 = 2^5$. Numărul de stări este 2 ridicat la *puterea* egală cu numărul de monede. În sens invers, dacă vrem să aflăm numărul de biți pe care-i obținem observând rezultatul aruncării monedelor, formula trebuie inversată folosind *logaritmi* în baza 2. Astfel, $2 = \log_2 4$, $3 = \log_2 8$, $4 = \log_2 16$, $5 = \log_2 32$. Cititorii familiarizați cu logaritmii vor observa că această formulă face ca biții de informație să se poată aduna. De exemplu, 2 biți + 3 biți = 5 biți pentru că $\log_2 4 + \log_2 8 = \log_2 32$ și, de fapt, există 32 de stări la fel de probabile pentru cinci monede aruncate.

Acum, să presupunem că stările *nu* au același grad de probabilitate: de exemplu, dacă una dintre monede e măsluită. Astfel, informația pe care o obținem când verificăm rezultatul aruncării va fi mai scăzută. Dacă rezultatul e perfect previzibil (probabilitate 1), atunci nu obținem informații suplimentare când îl privim: ne alegem cu zero biți. În majoritatea comunicațiilor din lumea reală, probabilitățile nu sunt uniforme. De pildă, în limba engleză litera *a* apare mult mai frecvent decât litera *x*, motiv pentru care jetoanele de la jocul de *Scrabble* au punctaj diferit în funcție de litera cu care sunt marcate. Un alt exemplu: în engleză, litera *q* e urmată întotdeauna de *u*, ceea ce face litera *u* să fie redundantă: nu obții biți de informație când primești un *u* după un *q*, prin urmare nu merită să pierzi resurse în încercarea de a-l strecura într-un mesaj codat.

Scanned with OKEN Scanner

Shannon a găsit o modalitate de a cuantifica informația din cazurile cu probabilitate neuniformă folosind o medie ponderată. Voi explica printr-un exemplu simplu. Să presupunem că aruncăm o monedă măsluită despre care știm că, în medie, va fi cap de două ori mai mult decât pajură, adică probabilitatea să fie cap este $^2/_3$, iar pajură, $^1/_3$ (suma probabilităților trebuie să fie egală cu 1). Conform teoriei lui Shannon, ponderea numărului de biți care corespunde celor două rezultate e dată pur și simplu de probabilitățile fiecăruia dintre ele. Astfel, media numărului de biți de informație pe care-i obținem verificând rezultatul acestei monede măsluite este de $-^2/_3\log_2{}^2/_3 - ^1/_3\log_2{}^1/_3 = 0{,}92$ biți, întru câtva mai puțin decât acel bit pe care l-am fi obținut dacă rezultatele ar avut probabilitate egală. E cât se poate de logic: dacă știm că e de două ori mai probabil să obținem cap decât pajură, atunci incertitudinea cu privire la rezultat e mai mică decât dacă am folosi o monedă nemăsluită, situație în care și reducerea incertitudinii prin observație e mai mică. Să luăm un exemplu extrem și să presupunem că e de șapte ori mai probabil să obținem cap decât pajură. În medie, numărul de biți de informație obținuți după fiecare aruncare a monedei e egal cu $-^7/_8\log_2{}^7/_8 - ^1/_8\log_2{}^1/_8 = 0{,}54$ biți. Putem exprima conținutul informațional al unui răspuns la o întrebare stabilind gradul de mediu de surprindere pe care acesta îl provoacă celui care-l ascultă. O monedă măsluită astfel încât să aibă ca rezultat de cele mai multe ori cap nu ne surprinde foarte mult.*

Dacă ne gândim o clipă, ne dăm seama că analiza lui Shannon poate fi aplicată în biologie. Informația e stocată în ADN printr-un cod genetic universal. Conținutul de informație al unei gene e transmis ribozomului prin ARN mesager și, odată

---

* Formula generală este $n = -\log_2 p$, unde n este numărul de biți, iar p este probabilitatea fiecărei stări. Acest număr trebuie să fie cuprins între 0 și 1, de unde nevoia de a folosi semnul minus.

Scanned with OKEN Scanner

ajuns acolo, e decodat și folosit la construirea proteinelor din secvențe de aminoacizi. Însă ARN-ul mesager e un canal de informare predispus la erori (vezi pagina 82). Prin urmare, manualul de instrucțiuni al vieții e echivalentul logic al analizei pe care a făcut-o Shannon informației codate trimise printr-un canal de comunicare ce poate înregistra erori.

Ce ne spune factorul-surpriză despre cantitatea de informații pe care o conține un organism? Ei bine, viața e un fenomen extrem de surprinzător*, prin urmare ne putem aștepta să conțină *foarte multă* informație de tip Shannon. Și chiar conține. Fiecare celulă din corpul nostru posedă aproximativ un miliard de baze ADN aranjate într-o anumită secvență de patru litere ale alfabetului biologic. Numărul de combinații posibile de patru la puterea un miliard, adică unu urmat de vreo șase sute de milioane de zerouri. Comparați acest număr cu totalul atomilor din univers: unu urmat de optzeci de zerouri. Formula lui Shannon pentru determinarea informației dintr-o catenă de ADN presupune adoptarea logaritmului, care ne dă aproximativ două miliarde de biți (mai multă informație decât conțin toate cărțile din Biblioteca Congresului Statelor Unite). Toată această informație e împachetată în a trilioana parte din volumul capului unui chibrit. În plus, informația din ADN e doar o fracțiune din totalul informației dintr-o celulă. Toate acestea ne arată cât de mult depinde viața de informație.**

---

* Exact așa și este. Am scris această secțiune a cărții în timp ce stăteam pe o plajă de lângă Sidney. Când am ajuns la partea despre surpriză, un câine vagabond a călcat neanunțat pe tastatură. Iată ce a adăugat discuției noastre: „V tvtgvtvfaal". Îl las pe cititor să evalueze conținutul de informație al acestei intervenții canine.

** Proprietățile impresionante de stocare a datelor pe care le are ADN-ul au creat un fel de industrie artizanală în rândul oamenilor de știință, care încarcă poezie, cărți și chiar filme în ADN-ul microbilor (fără să-i ucidă). Craig Venter a creat acest domeniu când a început să introducă „filigrane" în creațiile sale, inclusiv un citat din fizicianul Richard

Scanned with OKEN Scanner

Shannon a observat că formula lui matematică de cuantificare a informației în biți este, cu excepția semnului minus, asemănătoare formulei folosite de fizicieni pentru entropie, ceea ce sugerează că informația este, într-o oarecare măsură, opusul entropiei. Această conexiune nu e surprinzătoare dacă echivalăm entropia cu ignoranța. Dați-mi voie să explic. Am descris deja felul în care entropia e o măsură a dezordinii sau a caracterului aleatoriu (vezi caseta 3). Dezordinea e proprietatea *colectivă* a ansamblurilor mari. Nu are sens să spunem că o singură moleculă e dezordonată sau aleatorie. Cantități termodinamice precum entropia și căldura sunt definite printr-un număr enorm de particule (de exemplu, moleculele de gaz care se mișcă în toate părțile) și prin calcularea unei medii a acestora fără a ține cont de amănuntele fiecărei particule în parte. (O astfel de medie se numește uneori „aproximare grosieră.") Astfel, temperatura unui gaz e asociată cu energia medie de mișcare a moleculelor gazului. De reținut este faptul că ori de câte ori ne raportăm la o medie renunțăm la o parte de informație: cu alte cuvinte, acceptăm un grad oarecare de ignoranță. Înălțimea medie a unui londonez nu ne spune nimic despre înălțimea unei persoane anume. Tot așa, temperatura unui gaz nu ne spune nimic despre viteza unei anumite mo-

---

Feynman, text pe care l-a introdus în genomul modificat al unui microb reconstruit în laboratorul său. Mai recent, un grup de biologi de la Harvard au codat o versiune digitalizată a celebrului film cu un cal în galop realizat de Eadweard Muybridge în 1878 (prin care voia să demonstreze că există momente în care toate cele patru picioare ale calului sunt în aer în același timp) și au introdus-o în genomii unei populații de bacterii vii *E. coli*. (Vezi Seth L. Shipman *et al.*, „CRISPR–Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria", *Nature*, vol. 547, 345–349 (2017).) Aceste realizări sunt mai mult decât niște simple curiozități, ele atestă existența unei tehnologii ce poate deschide drumul introducerii unor dispozitive de „înregistrare a datelor" în celule cu scopul de a monitoriza procesele vitale.

Scanned with OKEN Scanner

lecule. Pe scurt: *informația se referă la ceea ce știm, iar entropia, la ceea ce nu știm.*

Am explicat deja că, atunci când aruncăm o monedă nemăsluită și privim rezultatul, obținem exact un bit de informație. Dar înseamnă asta că fiecare monedă „conține" exact un bit de informație? Și da, și nu. Răspunsul „moneda conține un bit" pornește de la premisa că există doar două stări posibile (cap și pajură). Aceștia sunt termenii în care ne referim, de obicei, la o monedă aruncată, dar acest criteriu suplimentar nu e absolut, ci depinde de natura observației și de măsurătorile pe care alegem să le facem. De exemplu, există multe informații cu privire la „capul" monedei (lucru valabil și pentru pajură). Dacă sunteți pasionați de numismatică și nu știți din ce țară provine moneda sau în ce an a fost bătută, atunci cantitatea de ignoranță relevantă („Imaginea cui se află pe monedă?") e mult mai mare decât un bit: poate că e de o mie de biți. Prin faptul că facem o observație în cazul în care rezultatul aruncării este cap („Aha, e Regele George V pe o monedă britanică din 1927!"), obținem o cantitate mult mai mare de informație. Astfel că întrebarea „Câți biți de informație conține o monedă?" e în mod limpede nedefinită în această formă.

Aceeași problemă apare și în cazul ADN-ului. Câtă informație stochează un genom? Mai devreme, am dat un răspuns clasic (mai multă decât Biblioteca Congresului SUA). Însă această afirmație presupune că bazele ADN vin sub forma unui alfabet format din patru litere (A, T, C, G), ceea ce înseamnă o șansă de unu la patru să ghicim care bază se află într-o poziție dată de pe molecula de ADN, în cazul în care nu cunoaștem nimic altceva despre secvență. Prin urmare, măsurarea unei baze concrete ne dă doi biți de informație ($\log_2 4 = 2$). Însă acest raționament se bazează pe premisa că toate bazele sunt la fel de probabile, ceea ce s-ar putea să nu fie adevărat. De exemplu, unele organisme sunt bogate în G și C și sărace în A și T. Dacă știm că avem de-a face cu un astfel de organism, vom schimba

Scanned with OKEN Scanner

metoda de a calcula incertitudinea: dacă încercăm să ghicim poziția lui G, sunt șanse mai mari să avem dreptate decât dacă am încerca să ghicim poziția lui A. Concluzie: informația obținută prin investigarea unei secvențe de ADN depinde de ceea ce știm sau, mai bine zis, de ceea ce nu știm. Entropia, așadar, se află în ochiul privitorului.*

Rezultatul e că nimeni nu poate spune cu absolută certitudine câtă informație există în cutare sau cutare sistem fizic.[3] Însă e, fără îndoială, posibil să spunem cât de multă informație *am obținut* făcând o măsurătoare. După cum am spus, informația înseamnă reducerea gradului de ignoranță sau de incertitudine cu privire la sistemul măsurat. Chiar dacă gradul general de ignoranță e ambiguu, *reducerea* incertitudinii poate fi definită foarte bine.

Cunoașterea puțină e lucru periculos

Dacă informația are un impact asupra lumii, ce ar trebui să considerăm că este? Oare respectă propriile legi, sau se supune pur și simplu legilor care guvernează sistemele fizice în care e conținută? Cu alte cuvinte, informația transcende cumva legile fizicii (chiar dacă nu le ocolește complet), sau e doar un epifenomen (ca să folosim un termen tehnic), agățându-se pur și simplu de procesele materiei? Informația în sine produce

---

* Ducând acest raționament la extrem, dați-mi voie să mă întorc la exemplul cu moneda. Fiecare atom al monedei ocupă o poziție în spațiu. Dacă am putea măsura unde se află fiecare atom, informația obținută ar fi astronomică. Dacă ignorăm mecanica cuantică, o particulă precum un electron, care ar putea foarte bine să fie adimensional (e un punct), ar reprezenta o cantitate *infinită* de informație pentru că ar fi nevoie de un grup format din trei numere infinit de lungi care să-i specifice locația exactă în spațiul tridimensional. Iar dacă o singură particulă are informație infinită, conținutul total de informație din univers va fi cu siguranță infinit.

Scanned with OKEN Scanner

vreun efect concret, sau e doar un indicator al activității cauzale a materiei? Poate fluxul de informații să fie vreodată separat de fluxul materiei sau energiei?

Pentru a răspunde acestor întrebări trebuie mai întâi se descoperim legătura dintre informație și legile fizicii. Primul indiciu despre o astfel de legătură a apărut odată cu demonul lui Maxwell, dar situația nu s-a schimbat până în anii '20. La acea vreme, Leo Szilárd, un evreu maghiar care locuia în Berlin, a hotărât să actualizeze experimentul lui Maxwell într-un mod în care să fie mai ușor de analizat.* Într-un articol numit „On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings" („Despre scăderea entropiei dintr-un sistem termodinamic prin intervenția unor ființe inteligente")[4], Szilárd a simplificat aranjamentul lui Maxwell imaginând o cutie care conține *o singură* moleculă (vezi figura 4). Pereții de la ambele capete ale cutiei se află în contact cu o sursă externă și constantă de căldură, ceea ce îi face să vibreze. Când molecula captivă lovește un perete, are loc un schimb de energie: dacă molecula se mișcă încet, cel mai probabil va primi din partea peretelui un impuls care îi va crește viteza. Dacă temperatura sursei externe de căldură e ridicată, pereții vor vibra și mai tare, iar molecula va ajunge, în medie, să capete viteză și mai mare, pentru că se lovește de pereții care acum vibrează mai puternic.** Asemenea lui Maxwell, Szilárd

---

* Asemenea lui Schrödinger și a multor altora, Szilárd a fugit în cele din urmă din Europa controlată de naziști. A plecat în Anglia și apoi în Statele Unite (din fericire pentru Aliați, pentru că Szilárd a participat la unele dintre primele experimente de fisiune nucleară). Anticipând faptul că Germania ar putea să-și construiască propria bombă atomică, Szilárd l-a convins pe Einstein să semneze o scrisoare comună adresată președintelui Roosevelt în 1939, cerând Statelor Unite să-și construiască propriile arme nucleare.

** Pentru că fluctuațiile termice sunt aleatorii, molecula se va mișca deseori mai încet sau mai repede decât media calculată. Dar ne putem

Scanned with OKEN Scanner

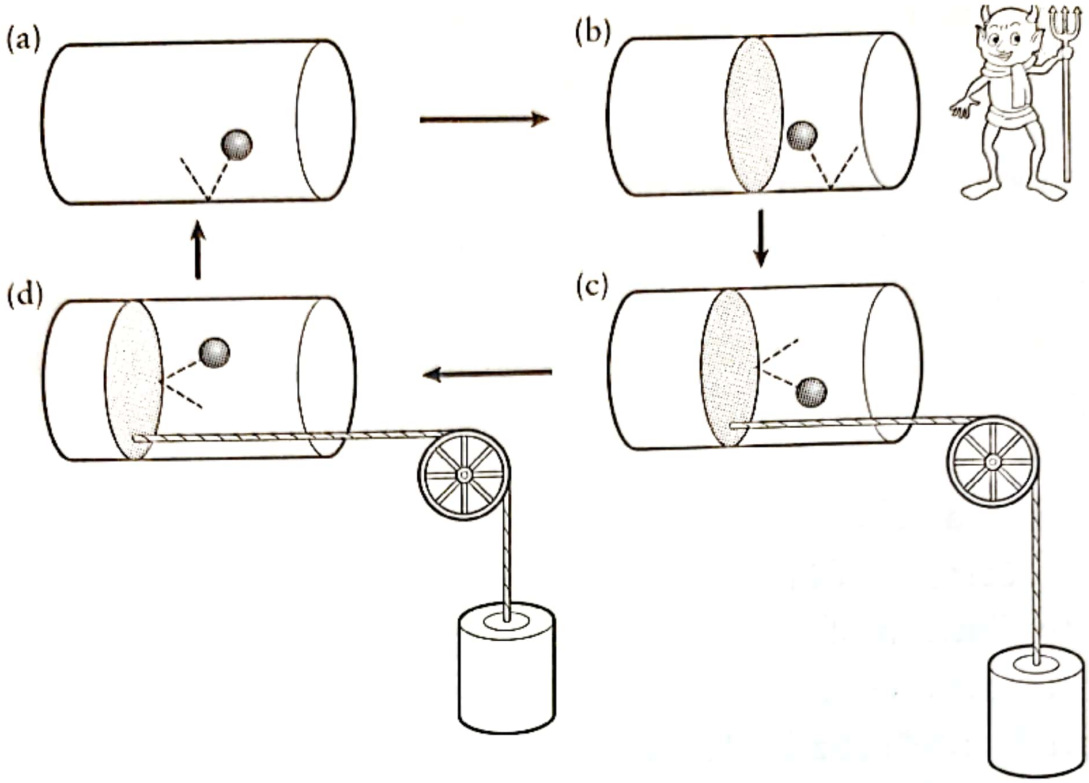


Figura 4 Motorul lui Szilárd. O cutie ce conține o singură moleculă de gaz care se poate afla fie în partea dreaptă, fie în partea stângă a cutiei. (a) Inițial, poziția moleculei e necunoscută. (b) Demonul introduce ecranul în mijlocul cutiei, apoi observă dacă molecula se află în stânga sau în dreapta acestuia. (c) Ținând cont de această informație, demonul atașează o greutate în partea corectă a separării. (Dacă molecula e în dreapta, ca în figură, demonul leagă greutatea în dreapta ecranului). (d) Molecula, care se deplasează cu viteză mare datorită energiei sale termice, se lovește de ecran, împingându-l în dreapta și ridicând greutatea. Astfel, demonul a transformat energia aleatorie a căldurii în lucru mecanic ordonat, folosindu-se de informația cu privire la situarea moleculei.

a introdus un demon și un ecran în experimentul său mental, însă a eliminat orificiul și obturatorul. Demonul lui Szilárd poate muta fără probleme ecranul în sus și în jos în mijlocul cutiei și lângă cei doi pereți din extremități (pentru asta e

---

imagina un ansamblu mare de cutii care conțin o singură moleculă: odată ce se ajunge la un echilibru între molecule și sursa externă de căldură, distribuția vitezei ansamblurilor de molecule va fi identică cu cea a unui gaz aflat la aceeași temperatură.

Scanned with OKEN Scanner

nevoie de niște fante). Mai mult, ecranul e liber să alunece înainte și înapoi în această cutie (fără frecare). Dispozitivul e cunoscut drept motorul lui Szilárd.

Începând prin a ține ecranul în afara cutiei, demonul are sarcina de a stabili *în care parte* a cutiei se află molecula. Demonul introduce ecranul mobil la mijlocul cutiei, împărțind-o în două. Acum urmează pasul crucial. Când molecula atinge ecranul, îl împinge puțin. Pentru că ecranul e liber să se miște, acesta va ricoșa și va căpăta energie; molecula, în schimb, va pierde energie. Deși aceste lovituri moleculare ni se par mici, ele pot fi (teoretic) folosite pentru a exercita lucru mecanic util și a ridica, de exemplu, o greutate. Pentru a face acest lucru, greutatea trebuie legată de ecran și să se afle în partea cutiei care conține și molecula; altfel, greutatea va cădea (vezi figura 4c). Pentru că demonul știe unde se află molecula, știe și în care parte să prindă greutatea (teoretic, prinderea acesteia poate fi făcută cu un consum de energie minim). Înarmat cu această frântură de informație, adică *informația pozițională*, demonul reușește să transforme o parte din energia termică aleatorie a moleculei în lucru mecanic direcționat. Demonul poate aștepta până când ecranul ajunge până la capătul cutiei, moment în care poate să desfacă legătura, să fixeze greutatea acolo unde se află și să scoată ecranul prin fanta din capătul cutiei. Toți aceștia sunt pași care, din nou, teoretic, nu necesită energie. Molecula poate recupera imediat energia consumată când a ridicat greutatea lovindu-se din nou de pereții plini de vibrații ai cutiei. Întregul ciclu poate fi repetat.* Rezultatul va fi din

---

* Folosind formula lui Shannon, pot fi mai precis în privința demonului. În cazul motorului lui Szilárd, molecula e la fel de probabil să fie în stânga sau în dreapta cutiei. Observând în care parte se află, demonul reduce incertitudinea de la 50:50 la 0, ceea ce înseamnă, conform formulei lui Shannon, că obține exact un bit de informație. Când acest unic bit e folosit pentru a ridica o greutate, cantitatea de energie extrasă din rezervorul de căldură depinde de temperatură, *T*. Putem calcula foarte ușor

Scanned with OKEN Scanner

nou transferul continuu de energie din bazinul de căldură către greutate, care transformă căldura în lucru mecanic cu eficiență de 100%, punând în mare pericol fundamentul celei de-a doua legi a termodinamicii.

Dacă asta ar fi toată povestea, motorul lui Szilárd ar deveni visul oricărui inventator. Bineînțeles, nu e toată povestea. Trebuie pusă întrebarea evidentă în legătură cu facultățile remarcabile ale demonului. Pentru început, cum știe unde se află molecula? Poate să vadă? Dacă da, în ce fel? Să presupunem că demonul luminează cutia ca să descopere molecula. În acest caz, lumina va degaja energie nerecuperabilă care se va transforma în căldură. Un calcul grosier sugerează că procesul de obținere a informației neagă orice avantaj al activității demonului. Când contrazicem a doua lege trebuie să plătim prețul entropiei, iar Szilárd a conchis, destul de logic, că prețul este însăși măsurarea.

Laptopul suprem

Lucrurile ar fi rămas aici dacă n-ar fi apărut o ramură complet diferită a științei: industria informatică. Deși e adevărat că demonul trebuie să obțină informația despre poziția moleculei, acesta e doar primul pas. Informația trebuie *procesată* în creierul extrem de mic al demonului pentru a-i permite să ia decizii corecte în legătură cu mecanismul obturatorului.

Când Szilárd a inventat motorul care-i poartă numele, tehnologia informației și computerele trebuiau să mai aștepte

---

forța ecranului datorată bombardamentului moleculei captive. Cu cât temperatura e mai mare, cu atât forța e mai mare. Pornind de la acest calcul, descoperim imediat că lucrul mecanic maxim posibil obținut de motorul lui Szilárd este $kT \ln 2$. Aici, cantitatea k (cunoscută drept constanta lui Boltzmann) e necesară pentru a exprima răspunsul în unități de energie, în jouli. Dacă introducem numerele, constatăm că, la temperatura camerei, un bit de informație produce 3×10^{-21} jouli.

Scanned with OKEN Scanner

două decenii ca să apară. Însă în anii '50, domeniul computerelor digitale asemănătoare celor pe care le cunoaștem azi (precum cel la care scriu acum cartea) înregistra salturi uriașe. Una dintre principalele companii care impulsiona aceste eforturi era IBM. Aceasta a construit un centru de cercetare la nord de orașul New York, a recrutat unele dintre cele mai luminate minți în materie de matematică și informatică și le-a dat sarcina să descopere „legile calculului informatic". Specialiștii implicați în acest proiect erau nerăbdători să descopere principiile fundamentale care arată exact ce poate fi calculat și cât de eficient poate fi făcut calculul. În acest sens, informaticienii procedau asemenea fizicienilor din secolul al XIX-lea care voiau să identifice legile fundamentale ale motoarelor termice. Însă, de data asta, lucrurile erau mult mai rafinate. Întrucât computerele sunt ele însele aparate fizice, se pune problema cum pot legile informaticii să se îmbine cu cele ale fizicii (mai ales legile termodinamicii), care guvernează componentele fizice ale computerelor. Acest domeniu era numai bun pentru învierea demonului lui Maxwell.

Un pionier al acestei provocări uriașe a fost Rolf Landauer, fizician de origine germană care a fugit și el de naziști și s-a stabilit în Statele Unite. Landauer era interesat de limitele *fizice* fundamentale ale informaticii. Știm cu toții că orice laptop, în urma utilizării, se încălzește. O povară financiară majoră a informaticii ține de disiparea acestei călduri: de exemplu, proiectarea ventilatoarelor și a sistemelor de răcire, ca să nu mai vorbim de costul electricității care le alimentează. Doar în Statele Unite, căldura reziduală din calculatoare consumă anual 30 de milioane de dolari din PIB, cifră care se află în creștere.*

De ce generează computerele căldură? Motivele sunt multiple, dar unul dintre ele evidențiază exact ceea ce se înțelege

* Un exemplu analizat intens este minarea de bitcoin, despre care se presupune că ar consuma mai mult curent electric decât toată Danemarca.

Scanned with OKEN Scanner

prin „calcul". Să luăm o problemă de aritmetică simplă, de exemplu o împărțire lungă, care poate fi rezolvată și pe hârtie. Începem cu două numere (numărătorul și numitorul) și obținem un număr (rezultatul) plus niște rânduri scrise de care avem nevoie ca să ajungem la el. Dacă nu ne interesează decât rezultatul (output-ul, în jargon informatic), atunci putem renunța la numerele ce alcătuiesc input-ul și la toate etapele intermediare. Dacă eliminăm acești pași, calculul devine logic ireversibil: nu ne putem da seama care a fost întrebarea uitându-ne la răspuns. (Exemplu: 12 poate fi 6 × 2 sau 4 × 3 sau 7 + 5.) Computerele fac același lucru: preiau date de input, le procesează, afișează un rezultat și (în general doar când memoria trebuie eliberată) șterg în mod ireversibil informația stocată.

Aceste ștergeri generează căldură. Fenomenul ne e cunoscut din exemplul cu seria de împărțiri: dacă ștergem cu guma ce am scris înainte de rezultat, creăm frecare, ceea ce înseamnă căldură, ceea ce înseamnă entropie. Până și microcipurile sofisticate generează căldură când elimină informație în sistem binar (1 și 0).* Cum ar fi să putem crea un computer care procesează informația fără să producă *nici un pic de căldură*? Ar putea funcționa fără costuri: laptopul suprem![5] Orice companie ar reuși să-l producă ar pune imediat stăpânire pe industria informatică. Nu-i de mirare că IBM era interesată de un astfel de proiect. Din păcate, Landauer a fost nevoit să renunțe la visul său când a argumentat că, atunci când informația procesată într-un computer implică operațiuni ireversibile logic (ca în exemplul aritmetic de mai sus), se va disipa în mod inevitabil căldură la resetarea sistemului în vederea efectuării următorului calcul. Landauer a calculat entropia minimă necesară

* Există o diferență importantă între eliminarea fizică informației în sistem binar și resetarea memoriei computerului la o stare de referință, precum o peste tot, care creează o „tabula rasa". Ultima situație este cea studiată de Landauer.

Scanned with OKEN Scanner

pentru a șterge un bit de informație, rezultat cunoscut acum drept limita Landauer. Pentru cei curioși, la temperatura camerei, ștergerea unui bit de informație generează 3×10^{-21} jouli, o parte absolut infimă din căldura necesară fierberii apei în ibric. Nu e multă căldură, însă stabilește un principiu important. Demonstrând legătura dintre operațiile logice și generarea căldurii, Landauer a descoperit o legătură profundă între fizică și informație, nu în sensul demonic, relativ abstract, al lui Szilárd, ci în sensul foarte concret (ce implică costuri financiare) pe care îl are astăzi în industria informatică.[6]

Începând cu Landauer, informația a încetat să mai fie o cantitate vag mistică și a devenit puternic ancorată în lumea materială. Pentru a rezuma această schimbare a perspectivei, Landauer a venit cu un dicton devenit între timp celebru: „Informația este de natură fizică!"[7] Cu asta voia să spună că toată informația trebuie legată de obiecte fizice: aceasta nu plutește pur și simplu liberă în eter. De pildă, informația din computerul vostru e stocată sub formă de tipare în hard disk. Informația e un concept alunecos pentru că, deseori, substratul său nu pare important. Putem copia conținutul unui hard disk pe un stick de memorie sau îl putem transmite prin Bluetooth sau printr-o fibră optică sau chiar în spațiu. Cât timp transferul e făcut corect, informația va rămâne aceeași când trece dintr-un tip de sistem fizic în altul. Această independență față de substrat pare să-i dea informației „o viață proprie", o existență autonomă.

În acest sens, informația are proprietăți în comun cu energia. Asemenea informației, energia poate trece de la un sistem la altul și, în anumite condiții, e conservată. Dar am putea spune că energia are existență autonomă? Să ne gândim la o problemă simplă de mecanică newtoniană: ciocnirea a două bile de biliard. Să presupunem că bila albă e proiectată cu precizie spre o bilă roșie staționară. Are loc impactul, iar bila roșie e aruncată spre un buzunar. Ar fi corect să spunem că „energia"

Scanned with OKEN Scanner

a provocat mişcarea bilei roşii? E adevărat că era nevoie de energia cinetică a bilei albe pentru a propulsa bila roşie, iar o parte din această energie a fost transferată în momentul ciocnirii. Aşa că, într-un fel, da, energia (mai precis, transferul de energie) a fost un factor cauzal. Însă fizicienii nu ar pune problema în aceşti termeni. Ar spune doar că bila albă a lovit-o pe cea roşie, făcând-o să se mişte. Însă pentru că energia cinetică e prezentă la nivelul bilelor, acolo unde merg bilele merge şi energia. Aşa că nu e greşit să atribuim putere cauzală energiei, dar e întru câtva nerealist. Am putea descrie amănunţit şi precis ciocnirea bilelor fără să ne referim deloc la energie.

Oare acelaşi lucru e valabil şi în privinţa informaţiei? Dacă toată puterea cauzală se află în materia subiacentă în care e conţinută informaţia, ar putea fi considerat la fel de nerealist, deşi convenabil, să discutăm despre informaţie ca având rol de cauză. Aşadar, e informaţia reală, sau e doar un mod convenabil de a ne gândi la procese complexe? Nu există consens în această privinţă, însă îmi voi asuma acest risc şi voi afirma că informaţia are un fel de existenţă independentă şi are putere cauzală. La acest punct de vedere am ajuns în parte datorită cercetărilor pe care le voi descrie în capitolul următor şi care implică monitorizarea tiparelor schimbătoare de informaţie în cadrul unor reţele care par să se supună anumitor legi universale ce transcend substratul fizic, unde sunt găzduiţi biţii.

Să citim mintea demonului

Dacă limita lui Landauer e cu adevărat fundamentală, atunci trebuie să se aplice şi în cazul informaţiilor procesate în creierul demonului. Landauer nu a mers însă pe această pistă. Un alt specialist de la IBM, Charles Bennett, a investigat această problemă 20 de ani mai târziu. Concepţia dominantă la acea vreme încă era că demonul nu poate încălca a doua lege a termodinamicii pentru că orice avantaj ce reduce entropia câşti-

Scanned with OKEN Scanner

gat prin trucurile sale este negat de costurile producătoare de entropie pe care le presupune faptul de a detecta unde se află moleculele. După ce a studiat intens problema, Bennett a început să suspecteze că părerea generală e greșită. Bennett a găsit o metodă de a detecta starea moleculelor fără a genera entropie.* Dacă e să ținem cont de a doua lege, a spus Bennett, atunci entropia compensatoare trebuie să vină de altundeva. La prima vedere, exista un răspuns pregătit: natura ireversibilă a calculului, și anume contopirea numerelor care trebuie să genereze un răspuns. Dacă acest lucru era realizat în mod direct, urma să creeze căldură. Dar chiar și aici Bennett a găsit o portiță de scăpare. A arătat că *toate* calculele pot să fie, de fapt, reversibile. Ideea e simplă. În exemplul cu hârtia și creionul, ar fi suficient să păstrăm o înregistrare a input-urilor și a pașilor intermediari pentru a putea merge în sens invers pe firul seriei de împărțiri. Am putea foarte ușor începe cu răspunsul și termina cu întrebarea, pentru că toate lucrurile de care avem nevoie sunt pe hârtie. Într-un computer se poate obține același lucru cu ajutorul unor porți logice special create, legate între ele pentru a forma circuite ce permit păstrarea informației undeva în sistem. Într-un astfel de aranjament, nici un bit nu e șters și nu e produsă nici un fel de căldură, adică entropia nu crește. Trebuie să subliniez faptul că, în ziua de azi, computerele se află foarte departe de posibilitatea teoretică a calculului reversibil. Însă aici discutăm despre chestiuni de principiu și nu există nici un motiv pentru care să nu ne putem apropia într-o bună zi de limita teoretică.

Acum ne întoarcem de unde am plecat în privința demonului. Dacă poate obține informație despre molecule pe baza unor costuri entropice neglijabile, dacă poate procesa informația în mod reversibil în creierul lui minuscul și poate manevra

* Exemplele sale sunt foarte idealizate și nu ne preocupă aici.

Scanned with OKEN Scanner

fără efort obturatorul înseamnă că, prin repetarea neîntreruptă a acestui proces, demonul poate genera mișcare perpetuă.

Dar unde e problema? Există o problemă, iar Bennett consideră că e ascunsă în expresia „repetarea neîntreruptă".[8] Să ne gândim puțin: demonul trebuie să proceseze informația obținută astfel încât să opereze corect mecanismul. În principiu, procesarea ar putea fi realizată în mod reversibil, fără a produce căldură, dar numai dacă demonul păstrează în memorie toți pașii calculului. Bun. Dar dacă demonul repetă trucul, se va adăuga informație la fiecare ciclu. Cu timpul, memoria internă a demonului va fi suprasaturată cu biți de informație. Prin urmare, secvența de calcul poate fi inversată numai în măsura în care există suficientă memorie. Pentru a opera într-o manieră cu adevărat eficientă, un demon finit trebuie să fie spălat pe creier după fiecare ciclu: adică trebuie să i se șteargă memoria și să revină la starea inițială înainte de a porni următorul ciclu. Acesta e pasul care se dovedește călcâiul lui Ahile pentru demon. Bennett a dovedit că *actul de ștergere a informației* generează exact câtă entropie trebuie pentru a plăti aparenta încălcare a celei de-a doua legi prin activitățile demonului.

Cu toate astea, subiectul demonului continuă să genereze controverse. De exemplu, ce se întâmplă dacă avem la dispoziție un număr infinit de demoni, astfel încât atunci când creierul unuia se blochează un altul să-l înlocuiască? De asemenea, o analiză mai generală ne arată că am putea face un demon în care suma entropiei de observație și a entropiei de ștergere să nu poată fi niciodată mai mică decât limita Landauer. În acest sistem, povara entropică poate fi distribuită între observație și ștergere în orice combinație.[9] Încă rămân multe întrebări fără răspuns.

Scanned with OKEN Scanner

Motoare pe bază de informație

Având în vedere felul în care am descris aceste lucruri, încă rămâne ceva magic în acțiunile demonului ca agent inteligent. Desigur, nu trebuie să fie o ființă conștientă sau inteligentă în sensul obișnuit al termenului? Trebuie să poată fi înlocuit cu un agent fără minte (cu un robot demonic) care să îndeplinească aceeași funcție. Recent, Christopher Jarzynski de la Universitatea Maryland și doi colegi de-ai săi au născocit un astfel de aparat, pe care l-au numit motorul pe bază de informație. Iată fișa postului său: „Extrage în mod sistematic energie dintr-un unic rezervor termic și folosește acea energie pentru a ridica un obiect cu masă contra gravitației, în timp ce scrie informație într-un registru de memorie".[10] Deși nu e deloc un instrument practic, motorul lor imaginar oferă un experiment mental ce ne permite să analizăm amestecul tripartit de căldură, informație și lucru mecanic și să descoperim schimburile realizate la nivelul fiecărei componente.

Mecanismul lui Jarzynski seamănă cu jucăria unui copil (vezi figura 6). Demonul însuși e doar un inel care se poate roti în plan orizontal. O tijă verticală e aliniată paralelul cu axa inelului, iar perpendicular pe tijă sunt prinse palete ce formează unghiuri diferite cu ea și se rotesc în jurul său fără frecare. Unghiurile în sine nu contează: important e dacă paletele sunt în partea apropiată sau îndepărtată a celor trei tije coplanare ce pot fi observate în imagine. În partea îndepărtată, ele reprezintă 0. În partea apropiată, reprezintă 1. Paletele reprezintă memoria demonului, care nu e decât un șir de cifre de forma 0100101011110 10... Întregul aparat e scufundat într-un bazin de căldură, astfel încât paletele se rotesc aleatoriu în toate părțile ca rezultat al agitației termice. Însă paletele nu se pot roti atât de mult încât să schimbe 0 în 1 și invers, pentru că cele două tije verticale le blochează calea. Spectacolul începe cu toate paletele de deasupra inelului aflate în poziția 0, adică

Scanned with OKEN Scanner

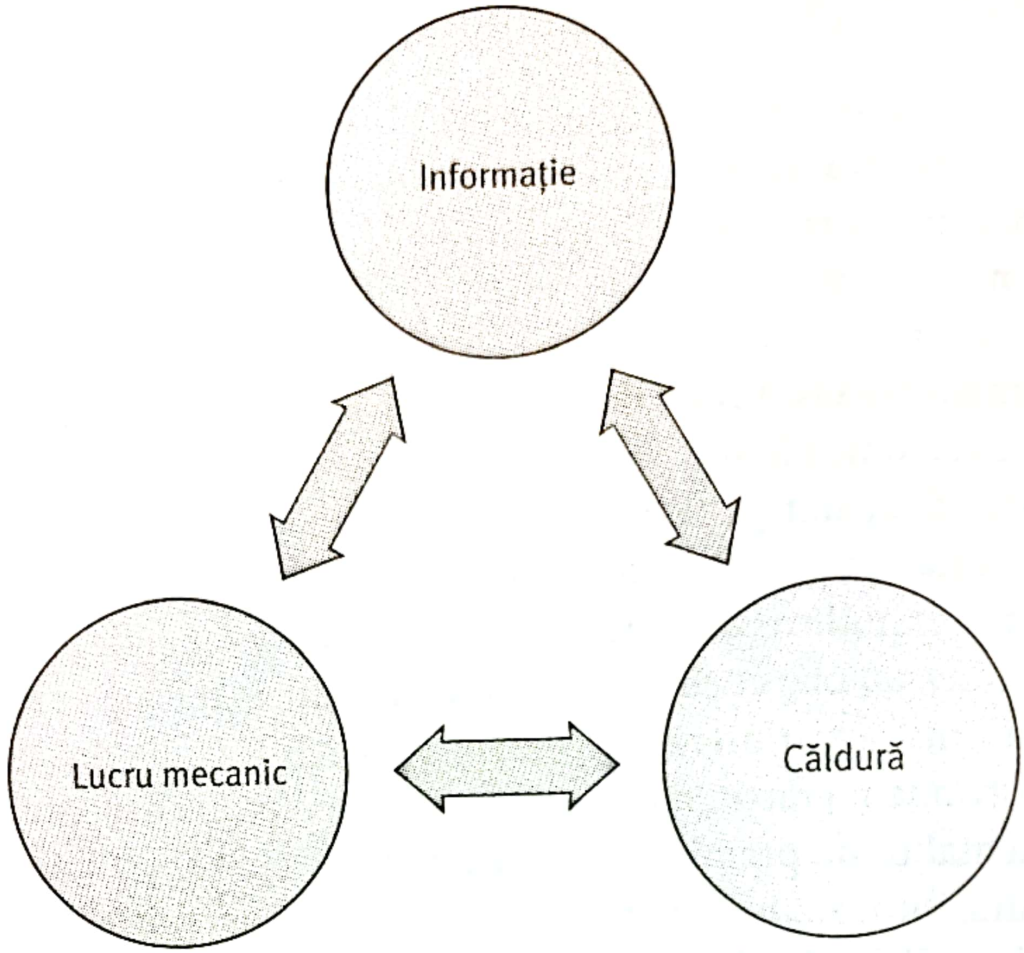


Figura 5 Schimbul tripartit dintre informație, căldură și lucru mecanic. Demonii lui Maxwell și Szilárd procesează informația care transformă căldura în lucru mecanic. Motoarele bazate pe informație funcționează transformând informația în căldură sau descărcând entropia într-un registru de informații gol. Motoarele convenționale folosesc căldura pentru a crea lucru mecanic, distrugând informația în acest proces (adică generând entropie).

așezate undeva în partea îndepărtată din figură. Aceasta e „memoria de input neutilizată" (demonul e spălat pe creier). Tija centrală și paletele ei coboară acum vertical în ritm constant, aducând pe rând fiecare paletă în inel și apoi eliminând-o pe sub el. Până acum nu pare că s-ar întâmpla nimic senzațional. Însă (și aceasta e o caracteristică importantă) una dintre tijele verticale are în ea un spațiu la nivelul inelului, astfel că fiecare paletă care trece prin inel e liberă preț de o clipă să se învârtă la 360 de grade. Drept urmare, fiecare o aflat în coborâre are șansa să se transforme într-un 1.

Scanned with OKEN Scanner

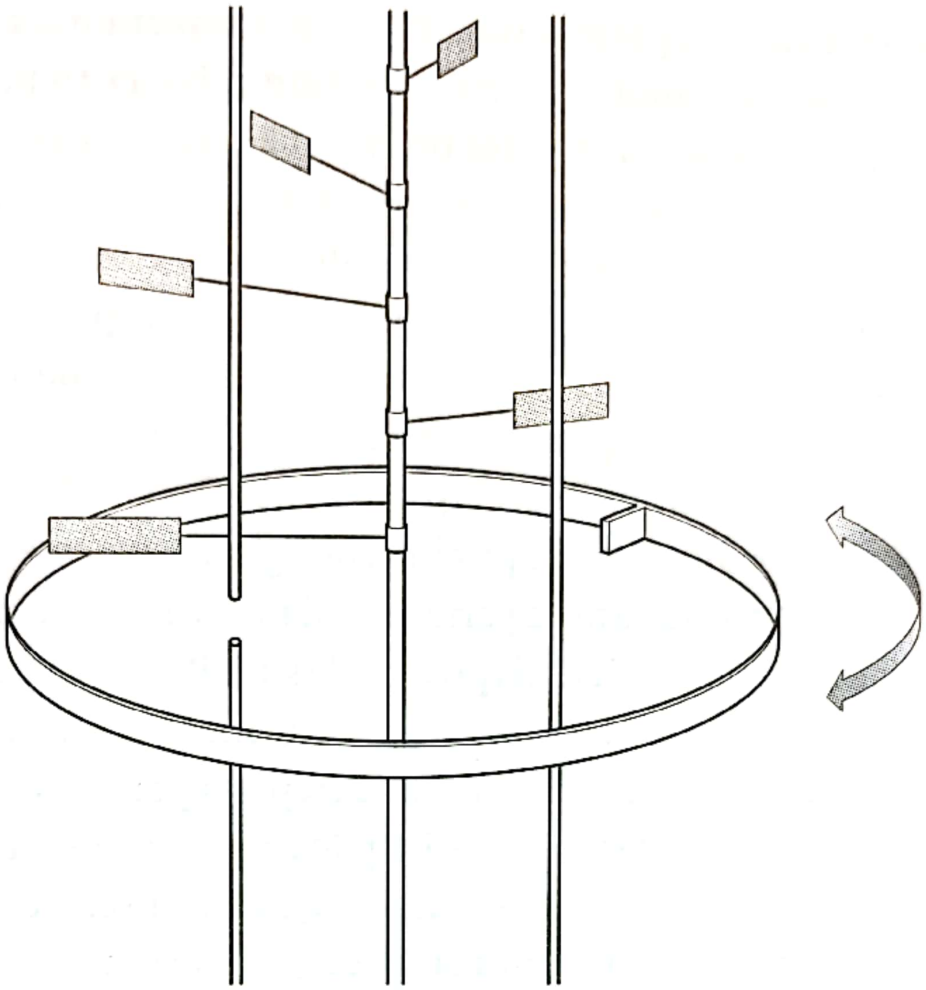


Figura 6 Planul unui motor bazat pe informație. În această variantă a experimentului lui Maxwell, tija centrală coboară continuu prin inel. Două tije verticale fixe se află de-o parte și de alta a tijei centrale și sunt coplanare cu ea. Una dintre ele are un spațiu liber la nivelul inelului. Paletele identice prinse de tija centrală sunt libere să se învârtă orizontal. Pozițiile lor codează 0 sau, respectiv, 1, în funcție de faptul dacă se află în partea apropiată sau îndepărtată față de cele trei tije din imagine. În configurația prezentată, starea inițială e reprezentată de 0. Inelul orizontal joacă rolul de demon simplificat. Se poate roti liber în plan orizontal. Are o singură lamă pe care paletele care se învârt o lovesc, putând să deplaseze inelul în ambele direcții. Întreg dispozitivul e scufundat într-un bazin de căldură, astfel ca toate componentele să aibă parte de fluctuații termice aleatorii. Din pricina spațiului liber din tija din partea stângă, inelul va avea parte de mai multe lovituri în sens contrar acelor ceasornicului (privind de sus). Prin urmare, dispozitivul transformă mișcarea termică aleatorie în rotații direcționale care pot fi folosite la ridicarea unei greutăți, însă prin acest lucru starea de output a paletelor (configurația lor de sub inel, care nu e ilustrată aici) devine acum un amestec aleatoriu de 1 și 0. Astfel, mașinăria a transformat căldura în lucru mecanic și a scris informația într-un registru.

Scanned with OKEN Scanner

Acum urmează partea crucială. Pentru ca memoria să-i fie de vreun folos demonului, paletele care coboară trebuie să interacţioneze cumva cu el (să reţinem că, în acest caz, demonul e inelul), altfel demonul nu-şi poate accesa memoria. Interacţiunea propusă de creatorii motorului e foarte simplă. Inelul demonic e prevăzut cu o lamă îndreptată spre interior şi fixată pe inel. Dacă vreuna dintre paletele care coboară se roteşte în sensul corespunzător, va lovi lama inelului, ceea ce îl va face să se rotească în acelaşi sens. Inelul poate fi învârtit în ambele sensuri, dar, din pricina configuraţiei asimetrice a spaţiului gol, acesta va avea parte de mai multe lovituri în sens contrar acelor ceasornicului (privind de sus). Prin urmare, mişcările termice aleatorii sunt transformate într-o rotaţie cumulativă într-o singură direcţie. Rotaţia treptată poate fi folosită pentru a crea lucru mecanic util. De pildă, inelul poate fi cuplat mecanic la un scripete astfel încât mişcarea în sens contrar acelor ceasornicului a inelului să ridice greutatea, iar cea opusă s-o coboare. În medie, greutatea va fi ridicată. (Dacă explicaţiile vi se par prea complicate, aveţi la îndemână şi o animaţie video folositoare.)[11]

Dar ce s-a întâmplat cu a doua lege a termodinamicii? S-ar părea că din nou obţinem ordine din haos, mişcare direcţionată din ceva aleatoriu şi lucru mecanic din căldură. Pentru a respecta a doua lege, entropia trebuie generată undeva, şi chiar este: în memorie. Traduse în configuraţii de palete care coboară, unii o devin 1, iar unii o rămân o. Înregistrarea acestei acţiuni e păstrată sub inel, unde cele două tije de blocare stabilesc definitiv starea de coborâre a paletelor, oprind orice altă oscilare între o şi 1. Rezultatul e că aparatul lui Jarzynski transformă o stare iniţială simplă oooooooooooooo... într-o stare de output complexă şi dezordonată (ba chiar aleatorie), cum ar fi 1000101110100101... Întrucât un şir format numai din o nu conţine informaţie, în vreme ce o secvenţă alcătuită din 1 şi o

Scanned with OKEN Scanner

e bogată în informație*, demonul a reușit să transforme căldura în lucru mecanic (ridicând greutatea) și a acumulat informație în memorie. Cu cât e mai mare capacitatea de stocare a fluxului de informații, cu atât mai mare e masa pe care demonul o poate ridica. Autorul observă următoarele: „Un litru de aer obișnuit cântărește mai puțin de jumătate de penny american, însă conține suficientă energie termică să arunce o bilă de bowling de 7 kg la trei metri deasupra Pământului. Un aparat care ar putea să exploateze acest belșug de energie, transformând mișcarea haotică a moleculelor care se ciocnesc în mișcare direcționată, ar fi extrem de util".[12] Chiar ar fi. Însă, asemenea demonilor lui Maxwell și Szilárd, cel imaginat de Jarzynski nu poate lucra la nesfârșit fără să-și curețe memoria și să șteargă informație, un pas care în mod inevitabil ar crește entropia.

De fapt, motorul lui Jarzynski poate funcționa în sens invers pentru a șterge informația. Dacă, în loc de o pe linie, starea de input se prezintă sub forma unui amestec de 1 și o (care reprezintă informația), atunci greutatea coboară, proces prin care compensează ștergerea cu propria energie potențială gravitațională. În acest caz, output-ul are mai mulți o decât input-ul. Autorul explică: „Când are mintea goală, demonul poate ridica greutatea. Dar când afluxul de biți e saturat [cu numere aleatorii], demonul nu mai poate efectua lucru mecanic. Astfel, registrul de memorie gol sau aproape gol joacă rol de resursă termodinamică ce este consumată când demonul joacă rolul de motor".[13] E surprinzător. Dacă ștergerea informației creează entropie, atunci obținerea unei memorii goale e echivalentul unei injectări de combustibil. În principiu, această *tabula rasa* poate fi orice: un cip de memorie magnetic sau un șir de o pe o rolă de hârtie. Conform lui Jarzynski, 300 de miliarde de

* De exemplu, în codul Morse, o poate însemna un punct, iar 1 poate însemna o linie.

Scanned with OKEN Scanner

miliarde de zerouri ar putea ridica un măr (în stil demonic) la un metru deasupra solului!

Ideea conform căreia *absența* a ceva (o memorie goală) poate deveni o resursă fizică amintește de „motorul improbabilității" din *Ghidul autostopistului galactic*.[14] Însă, în mod ciudat, este exact reversul analizei lui Charles Bennett. În acest moment, cititorul e, fără îndoială, stupefiat. Chiar poate un șir de zerouri să acționeze un motor? Poate informația însăși să servească drept combustibil, asemenea benzinei? Să fie toate acestea doar jocuri mentale, sau au legătură cu lumea reală?

Demoni reali și demonologie aplicată

La 140 de ani de când Maxwell și-a prezentat ideea, un demon maxwellian real a fost construit în orașul natal al omului de știință. În 2007, David Leigh și colaboratorii săi de la Universitatea Edinburgh au publicat amănunte ale proiectului lor într-un articol din *Nature*.[15] Timp de mai bine de un secol, ideea că cineva ar putea construi un demon părea incredibilă, dar tehnologia (mai ales nanotehnologia) a avansat atât de mult încât domeniul demonologiei aplicate a început să devină, în sfârșit, realitate.*

Grupul Leigh a construit un mic motor bazat pe informație format dintr-un inel molecular ce poate aluneca înainte și înapoi de-a lungul unei tije cu opritoare la fiecare capăt (arată ca o halteră). La mijlocul tijei se află o altă moleculă care poate

* Când fizicianul Richard Feynman a murit, a lăsat pe tablă un aforism celebru: „Ce nu pot construi nu pot înțelege". (Acestea sunt cuvintele pe care Craig Venter le-a inscripționat în organismul său artificial: vezi p. 55). Astăzi, oamenii de știință construiesc demoni maxwellieni și motoare bazate pe informație și le descoperă principiile de funcționare. Locul ocupat de informație în lupta eternă dintre ordine și haos începe, în sfârșit, să fie descoperit prin metode practice.

Scanned with OKEN Scanner

exista în două conformații, una care blochează inelul și alta care îi permite să treacă de obstacol. Astfel, joacă un rol de poartă, asemănător obturatorului mobil al lui Maxwell. Poarta poate fi controlată cu ajutorul unui laser. Sistemul se află în contact cu mediul înconjurător, păstrat la o temperatură finită, astfel încât inelul va jongla în mod aleatoriu înainte și înapoi de-a lungul tijei ca urmare a agitației termice normale. La începutul experimentului, e blocat într-una dintre jumătățile tijei, mișcarea fiindu-i oprită de molecula „poartă" aflată în poziția „închis". Cercetătorii au reușit să monitorizeze în detaliu activitatea inelului și porții și să verifice dacă sistemul chiar se îndepărtează, în mod demonic, de starea de echilibru termodinamic. Aceștia au confirmat că „informația cunoscută demonului care manevrează poarta" joacă rol de combustibil, în timp ce ștergerea ei crește entropia „conform soluției date de Bennett paradoxului demonului lui Maxwell"[16].

Experimentul de la Edinburgh a fost urmat imediat de altele. În 2010, un grup de cercetători japonezi a manipulat agitația termică a unei bobițe minuscule de polistiren și a anunțat următoarele: „Am verificat că informația poate fi transformată în energie potențială și că principiul fundamental al demonului rămâne valabil"[17]. Experimentatorii au comunicat că au reușit să transforme informația în energie cu o eficiență de 28%. Aceștia au conceput un viitor nanomotor care funcționează numai pe bază de „combustibil informațional".

Un al treilea experiment, realizat de un grup de la Universitatea Aalto din Finlanda, a coborât la scară nano prinzând un singur electron într-o cutie mică cu diagonala de câteva milionimi de metru, la o temperatură joasă, dar finită. Electronul a putut inițial să viziteze liber unul dintre cele două locuri (la fel ca în cutia din motorul lui Szilárd). Un electrometru sensibil stabilea unde se afla electronul. Această informație pozițională era apoi introdusă într-un aparat care creștea voltajul (o operațiune reversibilă, fără un necesar net de energie),

Scanned with OKEN Scanner

astfel încât să prindă electronul într-un loc (asemenea demonului care introduce ecranul). Apoi, energia a fost extrasă treptat din mișcarea termică a electronului și folosită pentru a produce lucru mecanic. În cele din urmă, voltajul a fost adus la valoarea inițială, completând ciclul. Echipa finlandeză a efectuat acest experiment de 2.944 de ori, obținând o medie de 75% din limita termodinamică a unui motor Szilárd perfect. E important de precizat că experimentul e un demon maxwellian *autonom*, „unde doar informația, nu și căldura, e schimbată direct între sistem și demon“[18]. Experimentatorii n-au intervenit asupra procesului și nici măcar nu au știut de fiecare dată unde se află electronul: măsurătoarea și activitatea de controlare a feedbackului au fost complet automate și autosuficiente. Nici un agent extern nu a fost implicat.

Rafinând mai mult experimentul, echipa finlandeză a cuplat între ele două astfel de aparate, considerându-l pe unul drept sistem și pe celălalt drept demon. Apoi au măsurat energia termică extrasă pe cale demonică, monitorizând răcirea sistemului și încălzirea corelată a demonului. Au numit această reușită nanotehnologică primul „frigider alimentat cu informație“ din lume. Dat fiind ritmul în care avansează tehnologia, dispozitivele demonice de acest fel vor fi, probabil, disponibile pe la mijlocul anilor 2020.* Așteptați-vă la un impact mare asupra comercializării nanotehnologiei, dar un impact probabil mai mic asupra vânzărilor de electrocasnice.

---

* Conform rezultatelor unui experiment ce a avut ca scop stabilirea raportului dintre informație și fluxul de căldură (experiment efectuat în cadrul programului Institutului Național Brazilian de Știință și Tehnologie pentru Informație Cuantică), căldura a fost făcută să treacă de la un sistem mai rece la unul mai cald (fenomenul de refrigerare) folosind particule cuantice corelate, un subiect pe care îl voi explica în capitolul 5.

Scanned with OKEN Scanner

Motoarele vieții: demonii din celulele tale

Informația e moneda vieții. —Christoph Adami[19]

Deși Maxwell ar fi fost, fără îndoială, încântat de apariția demonologiei practice, nici prin cap nu i-ar fi trecut că relația dintre informație și energia pe care aceasta o presupune a fost folosită de organismele vii de miliarde de ani încoace. Se pare că celulele vii conțin o mulțime de nanomecanisme extrem de eficiente și bine calibrate, alcătuite în mare parte din proteine. Lista include motoare, pompe, tuburi, foarfece, rotoare, manete și frânghii: instrumente cunoscute inginerilor.

Iată un exemplu uimitor: un tip de turbină format din două rotoare cuplate de un arbore. (Funcția sa în celulele vii este aceea de a transporta și depozita energie.) Rotorul se învârte când protonii (întotdeauna mulți în interiorul unei celule) traversează arborele într-o direcție. Dacă rotorul e făcut să meargă în sens invers, el pompează protoni în sens opus. Un grup de japonezi a efectuat un experiment ingenios în care unul dintre rotoare a fost luat și ancorat de o suprafață de sticlă pentru a fi studiat. Aceștia au atașat un filament molecular la capătul arborelui și l-au marcat cu o vopsea fluorescentă astfel încât să poată fi văzut la lumina microscopului când asupra lui se proiectează un fascicul laser. Au reușit să vadă cum rotorul se învârte în salturi discrete de 120 de grade la fiecare trecere a unui proton.[20]

Un alt biomecanism minuscul care a atras multă atenție e un fel de moleculă de transport numită kinezină. Aceasta transportă încărcături vitale mergând de-a lungul unor microfilamente care formează un tipar încrucișat între celule. Face acest lucru cu delicatețe, pas cu pas, ca să nu fie luată pe sus de bombardamentul neîncetat al moleculelor de apă aflate în agitație termică, ce saturează toate celulele vii și se mișcă de două ori mai repede decât un avion de linie. Un picior rămâne

Scanned with OKEN Scanner

ancorat de filament, iar celălalt vine din spate și se fixează în față, proces care se repetă în cazul celuilalt picior. Punctele de ancorare sunt locurile în care forțele de legare dintre picior și filament sunt cele mai favorabile: punctele se află la o distanță de 8 nanometri, deci fiecare pas are o lungime de 16 nanometri. E tulburător să ne gândim că miliarde de astfel de kinezine uluitoare se deplasează înăuntrul nostru tot timpul. Cititorii pot urmări pe YouTube o animație amuzantă care prezintă kinezina în timp ce-și transportă marfa.[21] (Cei care doresc amănunte mai tehnice pot citi caseta 4.)

O întrebare evidentă este: ce anume determină acest mecanism molecular să manifeste orientarea clară către realizarea unui obiectiv? Dacă pur și simplu ridică un picior, atunci agitația termică va împinge kinezina înainte și înapoi în mod aleatoriu. Cum reușește să-și croiască anevoie drum printre proiectilele neînduplecatului baraj molecular? Răspunsul se află în felul care kinezina acționează ca un fel de clichet (să ne amintim că un picior e mereu ancorat). Clicheții moleculari sunt exemple bune de demoni, care practic se ocupă de folosirea informației pentru a transforma energia termică aleatorie în mișcare direcțională.* Însă, pentru a nu se abate de la a doua lege, kinezina trebuie să se folosească de o sursă de putere.

CASETA 4: CUM POATE KINEZINA SĂ SE DEPLASEZE

ATP, combustibilul miraculos al vieții, e transformat într-o moleculă înrudită numită ADP (adenozin difosfat) când își pierde energia. ADP poate fi „reîncărcat" ca să devină ATP, deci ATP-ul e mai degrabă reciclat decât eliminat după ce și-a livrat energia. ATP și ADP sunt esențiale pentru operațiunea kinezinei. Kinezina are un mic orificiu în fiecare „călcâi", cu o formă care se potrivește exact cu aceea a moleculei de ADP, care încape perfect înăuntru și se leagă de kinezină. Când orificiul e ocupat, forma piciorului se modifică puțin, ceea ce-l face să se desprindă de filament și să se miște apoi liber. Când

* Procesul poartă numele de rectificare.

Scanned with OKEN Scanner

piciorul liber găsește următorul punct de ancorare, eliberează ADP-ul din orificiu și se prinde din nou de filament. În timpul acestui proces, celălalt picior (cel care inițial era în față) trebuie să rămână agățat de filament: dacă ambele picioare s-ar elibera în același timp, molecula de kinezină ar fi luată de curent, iar încărcătura s-ar pierde. Celălalt picior (care acum e în spate) va rămâne ancorat câtă vreme propriul orificiu pentru ADP rămâne gol. Dar va rămâne oare gol? Ei bine, același orificiu pentru ADP poate primi și ATP. Dacă un ATP care trece din întâmplare prin zonă întâlnește orificiul liber al piciorului ancorat, va intra în el. Atunci se întâmplă trei lucruri. În primul rând, molecula de kinezină se deformează și se reorientează astfel încât să oprească orice încercare a ATP-urilor din zonă să umple orificiul acum gol al piciorului din față. În al doilea rând, ATP-ul conține energie chimică stocată. În orificiu, acesta suferă o transformare chimică de la ATP la ADP. În acest proces, își eliberează energia în kinezină. Impulsul rezultat contribuie la avansarea mecanismului. În al treilea rând, transformarea în ADP presupune faptul că piciorul din spate conține acum o moleculă de ADP în orificiu, motiv pentru care se detașează de filament și începe să meargă înainte, astfel încât ciclul să se repete.[22]

Dați-mi voie să fac o mică paranteză și să explic ce se întâmplă aici din punctul de vedere al energiei, pentru că e important pentru problema generală pe care o discutăm. Combustibilul preferat al biologiei e o moleculă numită ATP (adenozin trifosfat). E ca o minibaterie foarte puternică și are caracteristica utilă că își poate păstra energia stocată până când e nevoie de ea, iar atunci... *bum!* Vieții îi place atât de mult să folosească combustibilul ATP pentru nenumăratele sale nanomecanisme (precum rotorul de mai sus), încât s-a estimat că unele organisme ard o cantitate de ATP egală cu masa propriului corp într-o singură zi.

Viața folosește mulți clicheți. Kinezina e doar un exemplu dintre mecanismele concepute să meargă *doar* înainte. Fenomenele fizice de la nivelul clicheților supuși fluctuațiilor termice ne conduc la o concluzie limpede. Clicheții funcționează doar dacă există fie o sursă de energie care să-i trimită într-o

Scanned with OKEN Scanner

direcție, fie o intervenție din partea unui sistem care procesează informații (demonul). În absența combustibilului sau a demonului, înaintarea nu poate avea loc. Entropia este generată întotdeauna: în primul caz, prin transformarea energiei motoare în căldură; în al doilea caz, din entropia procesării informației și ștergerea memoriei. Nimic nu-i gratis. Însă, prin faptul că își transportă marfa mecanic, și nu zburând prin torentul molecular, kinezina își reduce foarte mult costurile.

CASETA 5: CLICHETUL LUI FEYNMAN

Richard Feynman a încercat să înlocuiască demonul lui Maxwell cu un dispozitiv pur pasiv. Feynman și-a imaginat un clichet de tipul celor întâlniți în mecanismul de ceas (care nu permit acelor să se miște în sens antiorar; vezi figura 7). Dispozitivul e alcătuit dintr-o roată dințată prevăzută cu un clichet pe bază de arc care împiedică roata să alunece înapoi. Esențială pentru operarea mecanismului e asimetria dinților: au o parte abruptă și una înclinată. Asimetria stabilește sensul de rotire. E mai ușor pentru clichet să alunece pe suprafața înclinată a unui dinte decât pe cea abruptă. Apoi Feynman s-a întrebat dacă, odată mecanismul scufundat într-o baie de căldură cu temperatură uniformă, fluctuațiile termice aleatorii ar putea face roata să înainteze numai într-o direcție (în diagramă, să se învârtă în sensul acelor ceasornicului). Dacă de mecanism ar fi prinsă o frânghie, ar putea ridica o greutate, efectuând lucru mecanic creat doar de căldură. Nu așa stau lucrurile. Eroarea argumentului se află la nivelul clichetului. În caz de echilibru termodinamic, ar vibra din cauza fluctuațiilor termice, făcând uneori roata să se învârtă în sens opus. Feynman a calculat probabilitățile relative ale mișcărilor spre ambele sensuri și a argumentat că, în medie, sunt egale.[23]

A sosit momentul unui post-scriptum captivant. Mai există un tip de călător, dineina, care, parcă produsă de planurile unui proiectant nebun, merge în sens invers de-a lungul acelorași filamente pe care se deplasează kinezina. Întâlnirea inevitabilă dintre kinezină și dineină duce la episoade ocazionale de nervi în trafic și necesită niște manevre dibace. Există și

Scanned with OKEN Scanner

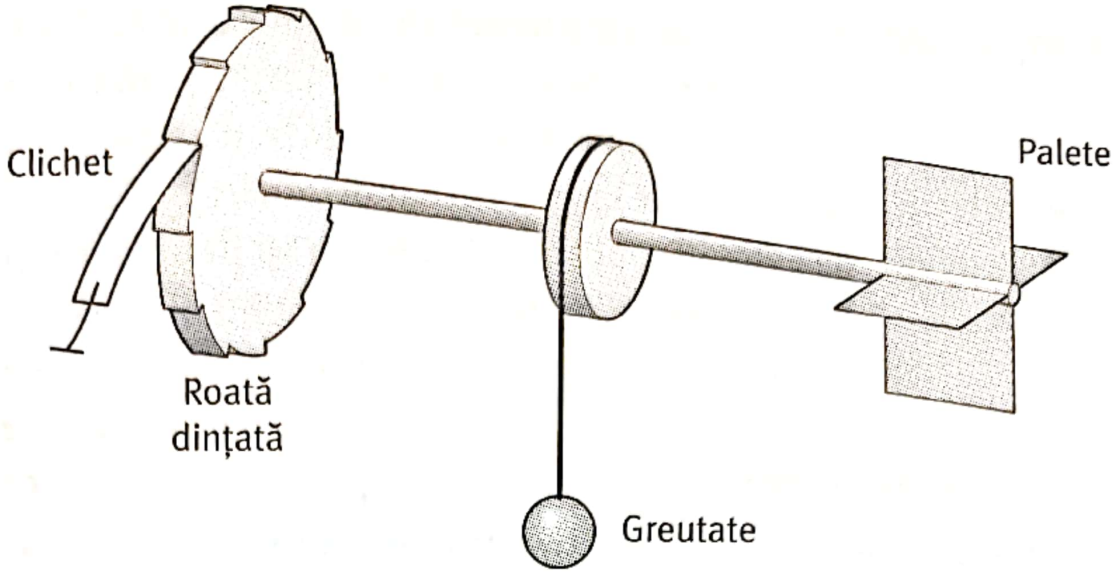


Figura 7 Mecanismul cu clichet al lui Feynman. În acest experiment mental, moleculele de gaz bombardează paletele, ceea ce provoacă mișcarea aleatorie în sens orar sau antiorar a arborelui. Dacă se rotește în sens orar, roata dințată permite axului să se învârtă, iar greutatea e ridicată. Dar dacă arborele încearcă să se învârtă în sens antiorar, clichetul îl blochează. Astfel, mecanismul pare să transforme energia gazului în lucru mecanic, încălcând a doua lege a termodinamicii.

blocaje aşezate din loc în loc pe filamente care trebuie ocolite şi presupun diferite manevre. Însă biologia a rezolvat toate aceste probleme cu o remarcabilă ingeniozitate: exploatând mecanismul demonic cu clichet, kinezina operează la o eficienţă impresionantă de 60% în privinţa consumului de combustibil ATP (comparativ cu motorul tipic al unei maşini, care are o eficienţă de aproximativ 20%).

Esenţa mecanismului vieţii se învârte în jurul ADN-ului şi ARN-ului, motiv pentru care nu ne surprinde că natura şi-a perfecţionat maşinăriile minuscule asociate cu aceste molecule astfel încât să poată opera cu o eficienţă termodinamică ridicată. Un exemplu îl constituie o enzimă cunoscută drept ARN-polimerază, un motor mic a cărui sarcină e să se târască de-a lungul ADN-ului şi să copieze (să transcrie) informaţia digitală în ARN, literă cu literă. Catena de ARN creşte treptat, adăugând litere potrivite la fiecare pas. Aparent, acest mecanism se

Scanned with OKEN Scanner

apropie foarte mult de varianta teoretică a demonului lui Maxwell, întrucât nu consumă aproape deloc energie. Știm că nu e 100% precisă deoarece uneori apar greșeli de transcriere (ceea ce e bine: nu uitați, astfel de erori sunt catalizatoarele evoluției darwiniene). Însă erorile pot fi corectate, iar în mare parte și sunt. Viața a creat metode incredibil de inteligente și eficiente de a citi ARN-ul rezultat și de a corecta abaterile.* Însă în ciuda tuturor eforturilor de a corecta totul, există un motiv foarte simplu pentru care procesul nu poate fi perfect: transcrierea poate fi greșită în multe feluri, dar corectă într-unul singur. Prin urmare, corectarea greșelilor e ireversibilă. Nu ne putem da seama de secvența eronată analizând secvența corectată. (Iată un alt exemplu în care e imposibil să deducem întrebarea din răspuns.) Logic vorbind, așadar, procesul de corectare contopește mai multe stări de input distincte într-o unică stare de output, care, după cum știm din cercetările lui Landauer, presupune mereu un cost entropic (vezi paginile 64–65).

Când celula se divide și ADN-ul e duplicat intră în acțiune un alt fel de motor demonic. Se numește ADN-polimerază și rolul său e să copieze ADN-ul dintr-o catenă într-o moleculă-fiică, care e construită din nou literă cu literă. Acest motor are în general un ritm de aproximativ 100 de perechi de baze pe secundă și, asemenea ARN-polimerazei, operează foarte aproape de perfecțiunea termodinamică. De fapt, putem manevra acest mecanism în sens invers numai tensionând ADN-ul. În laborator, acest lucru se poate realiza cu ajutorul unor dispozitive numite pensete optice. Pe măsură ce tensiunea crește, enzima se deplasează mai încet, până când, la o tensiune de aproape 40pN, se oprește complet (pN înseamnă „piconewton", a bilio-

* Asemenea tuturor proceselor fizice, chiar și o astfel de intervenție poate avea un rezultat greșit. La oameni, de exemplu, transcrierea corectată și editată de ARN conține în continuare aproximativ o greșeală la fiecare 100 de milioane de litere.

Scanned with OKEN Scanner

nima parte dintr-un Newton, o unitate de măsură standard a forței care poartă numele marelui savant). La tensiuni mai mari, micul motor merge înapoi și își descompune lucrarea literă cu literă.[24]

Bineînțeles, copierea ADN-ului e doar o mică parte din procesul de reproducere prin care o celulă se divide în două. O întrebare interesantă de inginerie e cât costă întregul proces de reproducere a celulei din punct de vedere energetic/entropic. Jeremy England de la MIT a analizat acest subiect cu ajutorul bacteriilor,[25] care dețin recordul mondial la reproducere rapidă (la fiecare 20 de minute). Date fiind lucrurile pe care le-am explicat până acum despre căldură și entropie, apare întrebarea dacă bacteriile se încălzesc sau nu ca urmare a reproducerii. Ei bine, se încălzesc, dar nu pe cât ne-am imagina uitându-ne la împingerile, alungirile și rearanjările moleculare. England susține că *E. coli* generează doar aproximativ de șase ori mai multă căldură decât limita minimă teoretică stabilită de termodinamică, așa că la nivel celular sunt aproape la fel de eficiente ca la nivel de nano.*

Cum putem explica eficiența termodinamică extraordinară a vieții? Organismele sunt pline de informație, de la ADN la organizări sociale, iar totul vine cu un preț entropic. Prin urmare, nu ne surprinde faptul că evoluția a rafinat mecanismele

---

* Poate vă întrebați cum o fi reușit England să calculeze entropia reproducerii, dată fiind complexitatea celulei bacteriene. Poate s-o facă grație unei legături fundamentale între entropia generată de un proces fizic și viteza la care se desfășoară procesul prin comparație cu procesul invers. De exemplu, procesul invers sintetizării unei catene de ARN din componentele sale distruge respectiva catenă de ARN în condiții asemănătoare. Cum se poate întâmpla asta? În apă, ARN-ul se dezintegrează spontan în aproape patru zile. Comparați asta cu intervalul de aproximativ o oră necesar sintetizării lui. Pornind de la acest raport, putem calcula producția minimă teoretică de entropie generată de această acțiune. Luând în considerare toți factorii, ajungem la estimările lui England.

Scanned with OKEN Scanner

vieții până în punctul în care acestea operează extrem de eficient. Organismele trebuiau să-și perfecționeze capacitatea de stocare și de procesare a informației, altfel ar fi murit fierte în propria căldură reziduală.

Deși la prima vedere nanomecanismele vieții se supun aceloraşi legi ale fizicii pe care le respectă mecanismele macroscopice, mediul în care funcționează e radical diferit. O celulă tipică de mamifer poate conține până la 10 milioane de proteine, ceea ce înseamnă că spațiul dintre proteine e de câțiva nanometri. Fiecare nanomecanism e zguduit de ciocnirea cu moleculele de apă care circulă cu mare viteză și care constituie cea mai mare parte din masa celulei. Condițiile seamănă cu acelea dintr-un club de noapte agitat: înghesuială și zgomot. Micile mașinării, dacă nu sunt ancorate, vor fi azvârlite de colo-colo peste tot. Un asemenea haos poate fi o problemă pentru buna funcționare a mecanismului celular, dar poate fi și un element pozitiv. Până la urmă, dacă interiorul celulei ar fi încremenit, nu s-ar mai întâmpla nimic. Însă există și un dezavantaj al bruierii termice neîncetate: viața trebuie să depună mult efort să repare pagubele și să reconstruiască structurile dezintegrate.

Putem concepe zgomotul termic în termeni de energie medie a mișcării moleculare. Moleculele mari, cum sunt proteinele, se deplasează mai lent decât moleculele de apă, dar din moment ce sunt mult mai masive (o proteină tipică are greutatea a 10.000 de molecule de apă), ele poartă cam aceeaşi cantitate de energie. Astfel, există o unitate naturală de energie la orice temperatură dată: la temperatura camerei, are o valoare de aproximativ 3×10^{-21} jouli. Aceasta e energia unei molecule tipice. Se întâmplă să fie echivalentă cu energia necesară pentru deformarea unor structuri moleculare importante precum kinezina, și chiar pentru desfacerea sau fracturarea moleculelor. Astfel, cea mai mare parte din mecanismul vieții se află la limita distrugerii prin căldură. Din nou, acest lucru pare o

Scanned with OKEN Scanner

problemă, dar de fapt este vital. Viața e un proces, iar tulburarea creată de zgomotul molecular e o ocazie de rearanjare și înnoire. În plus, facilitează transformarea unei forme de energie într-o alta. De exemplu, unele nanomecanisme biologice transformă energia electrică în mișcare; altele transformă energia mecanică în energie chimică.

Cititorul poate că se întreabă de ce atât de multe procese vitale au loc la scară nano, în condiții atât de vitrege. Coincidența scărilor de energie mai sus menționată ne oferă răspunsul. Pentru viața terestră, apa lichidă joacă un rol esențial, limitând intervalul de temperatură la care poate opera biologia. Se dovedește că doar la scară nano energia termică din acest interval de temperatură e comparabilă cu energia chimică și mecanică a mecanismului biologic, fiind astfel capabilă să inițieze o gamă largă de transformări.[26]

Dincolo de bit

Acum știm că organismele vii sunt pline de mecanisme minuscule care se agită ca niște demoni maxwellieni și asigură funcționarea vieții. Aceste mecanisme manipulează informația prin metode inteligente, extrem de eficiente, producând ordine din haos și evitând cu agilitate limitările celei de-a doua legi a termodinamicii. Motoarele bazate pe informație biologică descrise anterior și echivalentele lor tehnologice presupun bucle simple de feedback și control. Cu toate că moleculele în sine sunt complexe, logica funcționării e simplă: nu trebuie decât să ne gândim la kinezină, care lucrează neobosită la nivel molecular.

Celula ca întreg e o rețea vastă de gestionare a informației. Să luăm exemplul informației codate în ADN. Crearea proteinelor nu-i lucru simplu, depășind pasul de transcriere al ARN-ului mesager. Alte proteine trebuie să prindă aminoacizii potriviți de catenele de ARN de transfer, care apoi le duc la

Scanned with OKEN Scanner

ribozom pentru ca marfa lor să fie ancorată la momentul potrivit. Odată ce catena de aminoacizi e întregită, poate fi modificată de alte proteine în multe feluri, pe care le vom discuta în capitolul 4. Trebuie și să se plieze în structura tridimensională corespunzătoare, asistată de alte proteine care însoțesc molecula flexibilă în procesul de pliere. Toată această coregrafie superbă trebuie realizată în haosul termic al celulei.

De una singură, informația din genă e statică, dar, odată citită (când gena e *exprimată* ca producere a unei proteine), urmează tot felul de activități. ADN-ul rezultat e combinat cu alte fluxuri de informație care urmează diferite căi complexe din cadrul celulei și cooperează cu o mulțime de alte fluxuri de informație pentru a produce o ordine colectivă coerentă. Celula integrează toată această informație și înaintează sub forma unei singure unități printr-un ciclu cu diferite etape identificabile care culminează cu diviziunea celulară. Iar dacă extindem analiza asupra organismelor pluricelulare, care presupun organizarea uimitoare a dezvoltării embrionare, atunci devine izbitor de limpede că „informația" în sens de cantitate generală, precum energia, nu poate explica ce se întâmplă.

Acesta e punctul în care definiția pe care o dă Shannon informației, oricât de importantă e, nu reușește să explice în întregime informația biologică. E deficitară din două puncte importante de vedere:

1. Informația genetică depinde de context. Chiar și Shannon se străduia să arate că cercetarea sa se axează numai pe transmiterea de biți de informație definită în cel mai economic mod posibil și că nu are nimic de spus despre *sensul* mesajului codat. Cantitatea de informație Shannon e aceeași indiferent dacă o secvență de ADN codează instrucțiunile necesare construirii unei proteine sau e doar ADN „deșeu" arbitrar. Însă consecința acestui fapt pentru funcționalitatea biologică e profundă: proteina va îndeplini o sarcină vitală, în vreme ce deșeul genetic nu va face nimic important. Di-

Scanned with OKEN Scanner

ferența e analogă comparației dintre Shakespeare și un șir aleatoriu de litere. Pentru ca informația genetică să capete funcționalitate, trebuie să existe un mediu molecular (un context global) care să recunoască instrucțiunile și să reacționeze corespunzător.

2. Organismele sunt mecanisme de predicție. La nivelul organismului ca întreg, informația e adunată dintr-un mediu imprevizibil și fluctuant, e manipulată intern și apoi are loc o reacție optimă. Printre exemple se numără o bacterie care înoată spre o sursă de hrană sau furnicile care explorează mediul înconjurător ca să aleagă un nou cuib. Procesul trebuie să funcționeze bine, altfel, consecințele sunt letale. „Organismele trăiesc și mor în baza informației pe care o obțin despre mediul lor", spune Andreas Wagner.[27] Pentru a fi un mecanism de predicție bun, trebuie să poți învăța din experiențe, astfel încât să anticipezi mai bine viitorul și să faci o mutare inteligentă. Ca să fii eficient, însă, sistemul predictiv trebuie să fie selectiv cu informația pe care o stochează, deoarece ar neavantajos să țină minte tot. Toate acestea presupun o formă de reprezentare internă a lumii (un fel de realitate virtuală) care să permită judecăți statistice sofisticate.[28] Se pare că până și bacteriile sunt genii la matematică.

Dacă e să rezumăm aceste funcții superioare, putem spune că informația biologică nu e doar obținută, ci și *procesată*. Teoria informației elaborată de Shannon poate cuantifica numărul de biți dintr-o celulă sau dintr-un întreg organism, dar dacă discutăm despre procesarea informației, atunci trebuie să privim dincolo de biți și să apelăm la teoria *calculului*.

Organismele vii nu sunt simple depozite de informație, ci *computere*. De aceea, vom înțelege pe deplin viața numai dacă îi descoperim mecanismele computaționale. Iar pentru asta trebuie să facem o călătorie către fundamentele ezoterice, dar fascinante, ale logicii, matematicii și informaticii.

Scanned with OKEN Scanner

3. LOGICA VIEȚII

Creativitatea din biologie nu e diferită de creativitatea din matematică. —Gregory Chaitin[1]

Povestea vieții e alcătuită de fapt din două fire narative care se întrețes. Unul dintre ele e reprezentat de chimia complexă, o rețea bogată și elaborată de reacții, iar celălalt, de informație, nu doar cea stocată pasiv în gene, ci și cea care curge prin organisme și străbate materia biologică pentru a menține o anumită ordine. Astfel, viața e un amestec format din două tipare dinamice: cel chimic și cel informațional. Aceste tipare nu sunt independente, ci cuplate, formând un sistem de cooperare și coordonare care manevrează și amestecă frânturi de informație într-un balet cu o coreografie bine pusă la punct. Informația biologică e mai mult decât o supă de biți ce străbate și însuflețește conținutul material al celulelor – asta n-ar fi decât vitalism. Tiparele de informație controlează și organizează activitatea chimică în același fel în care un program controlează procesele unui computer. Prin urmare, îngropată adânc în fermentul chimiei complexe, există o rețea de operații logice. *Informația biologică este software-ul vieții.* Ceea ce ne sugerează că originea capacităților uluitoare ale vieții poate fi urmărită până la fundamentele logicii și calculului.

Un eveniment de cotitură în istoria calculului este reprezentat de o prelegere pe care distinsul matematician german David Hilbert a ținut-o în 1928 la Bologna, Italia, în fața unui congres internațional. Hilbert s-a folosit de ocazie ca să prezinte publicului problemele matematice nerezolvate care l-au

Scanned with OKEN Scanner

atras cel mai mult. Cea mai profundă dintre ele se referea la coerența internă a însuși domeniului. În esență, matematica nu e decât o serie elaborată de definiții, axiome* și deducții logice care decurg din ele. Considerăm de la sine înțeles faptul că funcționează. Dar oare putem fi absolut *siguri* că nici unul dintre raționamentele ce decurg din acest fundament auster nu va sfârși *vreodată* într-o contradicție? Sau că nu va fi în stare să ofere un răspuns? Poate că vă întrebați *cui îi pasă?* Ce importanță are dacă matematica e coerentă sau nu, câtă vreme funcționează și are rezultate practice? Cam aceasta era atmosfera în 1928, când o astfel de problemă îi preocupa doar pe câțiva logicieni și adepți ai matematicii pure. Însă lucrurile aveau să se schimbe dramatic.

Iată problema așa cum o vedea Hilbert: dacă *s-ar putea* dovedi că matematica e perfect coerentă înseamnă că ar fi posibil să testăm adevărul sau falsitatea oricărei afirmații matematice printr-o simplă procedură automată sau printr-un algoritm. N-ar fi nevoie să *înțelegem* matematică pentru a implementa algoritmul: ar putea fi dus la bun sfârșit de o armată de angajați fără studii (calculatoare plătite) sau de o mașină care să lucreze oricât de mult e nevoie. E oare posibilă o astfel de mașină de calcul infailibilă? Hilbert nu știa și a pus dilemei numele de *Entscheidungsproblem* („problema deciziei", deseori întâlnită sub denumirea de „problema opririi"). Această expresie a fost aleasă pentru a discuta problema fundamentală dacă există calcule care pur și simplu ar dura la infinit, adică *nu s-ar opri niciodată.* Mașinăria imaginară ar putea lucra o veșnicie fără să obțină nici un răspuns. Hilbert nu era interesat de cât de mult ar dura să obțină un răspuns, ci doar dacă sistemul va încheia procedura într-un timp finit și va oferi

* Axioma e o afirmație al cărei adevăr este evident: de exemplu, „dacă x = y, atunci y = x". Cu alte cuvinte, dacă la o fermă sunt tot atâtea oi câte capre înseamnă că sunt tot atâtea capre câte oi.

Scanned with OKEN Scanner

unul din două răspunsuri: adevărat sau fals. Poate că pare rezonabil să ne aşteptăm ca răspunsul să fie întotdeauna da. Ce ar putea să nu meargă bine?

Prelegerea lui Hilbert a fost publicată în 1929, acelaşi an în care a apărut articolul lui Szilárd despre demon. Cele două experimente mentale foarte diferite (un motor de calcul care nu se opreşte şi un motor termodinamic care poate genera mişcare perpetuă) sunt, de fapt, foarte strâns legate. Pe atunci însă, nici unul din cei doi cercetători nu era conştient de asta. Şi nu aveau nici cea mai mică idee că, undeva adânc sădit în cutia magică a enigmelor biologiei, ascuns de straturi şi straturi de complexitate năucitoare, ritmul neobosit al matematicii era cel care dădea sărutul vieţii.

Spre infinit şi mai departe

Matematica ne poate oferi deseori surprize, iar la momentul prelegerii lui Hilbert începuseră deja să apară probleme la nivelul fundamentelor logice ale acestui domeniu.* Se mai făcuseră încercări de a dovedi coerenţa matematicii, dar în 1901 au fost deviate de către filozoful Bertrand Russell, care a identificat un paradox faimos latent în toate sistemele formale de raţionament. Paradoxul lui Russell e uşor de prezentat. Să luăm în considerare următorul enunţ, numit A:

A: Această afirmaţie este falsă.

Să presupunem apoi că ne întrebăm: este A adevărat, sau fals? Dacă A e adevărat, atunci afirmaţia în sine declară că A e fals. Dar dacă A e fals, atunci afirmaţia e adevărată. Referindu-se la

* Originile „problemei opririi" apar într-o prelegere mai veche a lui Hilbert, ţinută în 1900 la Congresul Internaţional al Matematicienilor de la Sorbona, Paris.

Scanned with OKEN Scanner

sine într-un mod contradictoriu, A pare să fie în același timp adevărat *sau* fals, sau nici una, nici alta. Am spune că nu putem decide. Pentru că matematica e bazată pe logică, după Russell întregul fundament al disciplinei a început să pară șubred. Paradoxurile autoreferențiale ale lui Russell au plantat o bombă cu ceas care urma să aibă consecințe extrem de profunde în întreaga lume modernă.

A fost nevoie de opera excentricului logician austriac Kurt Gödel pentru a evidenția adevărata importanță a paradoxurilor autoreferențiale. În 1931, Gödel a publicat un articol în care demonstra că nu există nici un sistem coerent de axiome care să dovedească *toate* afirmațiile adevărate din aritmetică. Demonstrația lui se baza pe existența corozivă a relațiilor autoreferențiale, care implică faptul că vor exista mereu afirmații aritmetice adevărate ce nu pot fi *niciodată* dovedite ca fiind adevărate în cadrul acelui sistem de axiome. La un nivel mai general, decurge faptul că nici un sistem finit de axiome nu poate fi folosit pentru a-și dovedi propria coerență. De exemplu, regulile aritmeticii nu pot fi folosite pentru a dovedi că aritmetica va oferi mereu rezultate coerente.

Gödel a spulberat vechiul vis conform căruia raționamentele logice solide vor oferi întotdeauna adevăruri de necontestat. Rezultatul lui a fost unul dintre cele mai măreţe produse ale intelectului omenesc. Toate celelalte descoperiri despre lumea lucrurilor fizice sau despre lumea rațiunii nu spun ceva ce nu știam dinainte. Teorema lui Gödel ne spune că lumea matematicii conține noutăți nesfârșite – nici măcar un intelect nețărmurit, un zeu, nu poate cunoaște totul. E afirmarea supremă a nedeterminării .

Din moment ce a fost construită în tărâmul rarefiat al logicii formale, teorema lui Gödel nu avea nici o legătură evidentă cu lumea fizică, și cu atât mai puțin cu cea biologică. Dar numai cinci ani după aceea, matematicianul Alan Turing de la Universitatea din Cambridge a stabilit legătura dintre

Scanned with OKEN Scanner

rezultatul lui Gödel și problema opririi ridicată de Hilbert. Și-a expus rezultatul într-un articol numit „On computable numbers, with an application to the *Entscheidungsproblem*".[2] S-a dovedit a fi începutul a ceva de o importanță uriașă.

Turing e faimos pentru rolul pe care l-a jucat în spargerea codului mașinii Enigma folosită de germani în al Doilea Război Mondial, când a lucrat în secret la Bletchley Park, în sudul Angliei. Eforturile sale au salvat nenumărate vieți din tabăra Aliaților și au redus cu mai multe luni, dacă nu chiar cu ani întregi, durata războiului. Însă istoria va judeca articolul din 1936 ca fiind mai important decât contribuțiile sale din timpul războiului. Pentru a aborda problema lui Hilbert cu privire la calculul automat, Turing a imaginat o mașină de calcul asemănătoare unei mașini de scris, cu un cap care putea scana o bandă mobilă, având posibilitatea să și scrie pe ea. Banda trebuia să aibă lungime nelimitată și să fie împărțită în pătrate în care puteau fi tipărite simboluri (de pildă, 1 și 0). Pe măsură ce banda trecea orizontal prin mașină și fiecare pătrat ajungea în dreptul capului, mașina fie ștergea, fie scria un simbol, sau pur și simplu lăsa banda neatinsă, apoi o derula cu un pătrățel mai la stânga sau la dreapta, repetând întreaga procedură până când se oprea și oferea răspunsul. Turing a dovedit că un număr era calculabil dacă și numai dacă putea fi rezultatul unei astfel de mașini după un număr finit (dar posibil uriaș) de pași. Conceptul-cheie aici era acela de calculator *universal*: „O singură mașină ce poate fi folosită pentru a calcula orice secvență calculabilă".[3] În această afirmație simplă se află germenii computerului modern, un aparat pe care acum îl considerăm un lucru firesc.*

---

* Cu un secol mai devreme, Charles Babbage a ajuns la aceeași idee, dar nu a încercat să ofere o demonstrație formală a posibilității universale de calcul.

Scanned with OKEN Scanner

Din punctul de vedere al matematicii pure, importanța articolului lui Turing este dovada că nu există și nu poate exista vreodată un algoritm care să rezolve *Entscheidungsproblem* (problema opririi). În limbaj colocvial, e imposibil ca, pentru afirmații matematice generale, să știm dinainte dacă mașina Turing se va opri sau nu și va stabili că afirmația e adevărată sau falsă. Ca urmare, întotdeauna vor exista propoziții matematice pur și simplu *indecidabile*. Deși putem lua o propoziție decidabilă (de exemplu: 11 e un număr prim) și putem stabili dacă e adevărată sau falsă, nimeni nu poate dovedi că o afirmație e *indecidabilă*.

Cu toate că ramificațiile mașinii de calcul imaginată de Turing s-au dovedit uluitoare pentru matematicieni, aplicația practică a acestui concept a fost cea care a devenit stringentă. Odată cu izbucnirea războiului, Turing a primit sarcina să-și transforme ideea într-un aparat funcțional. În 1940, proiectase deja primul computer electronic programabil din lume. Botezat Colossus, a fost construit de Tommy Flowers la centrala Poștei din Dollis Hill de la Londra și instalat în baza secretă pentru spargerea codurilor din Bletchley Park. Colossus a devenit complet operațional în 1943, cu un deceniu înainte ca IBM să construiască primul aparat comercial de acest gen. Colossus avea unicul scop de a-i ajuta pe britanici să spargă codurile inamice, așa că a fost construit și operat în cea mai mare taină. Din motive politice, misterul care învăluia Bletchley Park a persistat multă vreme după sfârșitul războiului și reprezintă o parte din motivul pentru care, deseori, Flowers și Turing nu sunt recunoscuți drept primi arhitecți ai computerului. Acest lucru a permis și ca inițiativa comercializării computerelor să fie preluată de Statele Unite, unde secretele de război din acest domeniu au fost rapid declasificate.

Deși se adresa în principal matematicienilor, opera lui Turing avea să aibă implicații profunde pentru biologie. Arhitectura logică din organismele vii oglindește înseși axiomele

Scanned with OKEN Scanner

logicii. Autoreplicarea, caracteristică definitorie a vieții, provine direct din domeniul plin de paradoxuri al calculului propozițional și al autoreferențialității ce stă la baza teoriei computaționale, deschizând calea către proprietăți care acum ne sunt familiare, precum simulările și realitatea virtuală. Capacitatea vieții de a construi o reprezentare internă a lumii și a ei înseși (acționând ca agent, manipulând mediul și exploatând energie) reflectă întemeierea sa pe regulile logicii. Tot logica vieții e cea care permite biologiei să exploreze un univers de noutate nețărmurit, să creeze „forme dintre cele mai minunate", ca să folosim expresia memorabilă a lui Darwin.

Întrucât se regăsește în temeliile matematicii, indecidabilitatea constituie și o proprietate fundamentală a universului bazat pe legi matematice. Indecidabilitatea asigură că universul matematic va avea întotdeauna potențial creativ nețărmurit. Una dintre trăsăturile esențiale ale vieții e exuberanța ei fără limite: are o varietate și complexitate nedeterminate. Dacă viața reprezintă ceva cu adevărat fundamental și extraordinar, atunci această calitate a posibilității lipsite de constrângeri e cu siguranță esențială. Mulți dintre marii oameni de știință ai secolului XX au observat legătura dintre ideile lui Turing și biologie. Pentru a cimenta legătura lor cu biologia a fost nevoie de transformarea unui proces pur computațional într-un proces fizic de construcție.

Un mecanism care se autocopiază

La un ocean distanță de Alan Turing, în Statele Unite, emigrantul maghiar John von Neumann era la rândul său preocupat de conceperea unui computer electronic pentru uz militar, în cazul lui pentru Proiectul Manhattan (bomba atomică). A folosit aceeași idee ca a lui Turing: un mecanism programabil universal care putea calcula orice era calculabil. Însă Von Neumann era interesat și de biologie. Pasiunea lui l-a făcut să

Scanned with OKEN Scanner

propună ideea unui *constructor universal*, ale cărui detalii complete au văzut lumina zilei abia odată cu publicarea postumă a cărții sale, *Theory of Self-reproducing Automata.*[4]

Ideea de constructor universal e ușor de înțeles. Imaginați-vă un mecanism care poate fi programat să construiască obiecte alegând componente dintr-o rezervă de materiale și asamblându-le pentru a obține un produs funcțional. Astăzi știm că liniile de asamblare robotice fac exact acest lucru, dar Von Neumann se gândea la ceva mai ambițios de atât. Sistemele robotice nu sunt constructori universali: o linie de asamblare a unui automobil nu poate construi un frigider, de exemplu. Pentru a fi cu adevărat *universal*, mecanismul trebuie să poată construi *orice* e teoretic construibil, în funcție de o rezervă de componente. Aici apare elementul care face legătura între Gödel, Turing și biologie. Un constructor universal trebuie totodată să poată construi o copie *a lui însuși*. Amintiți-vă că exact paradoxul autoreferențialității l-a condus pe Turing la ideea computerului universal. Ideea unui mecanism autoreproducător duce, prin urmare, la aceleași probleme logice. De fapt, organismele vii par să fie mecanisme autoreproducătoare reale. Prin urmare, putem pătrunde arhitectura logică a vieții discutând despre conceptele pe care le presupun un computer universal (mașina Turing) și un constructor universal (mașina Von Neumann).

Un lucru important susținut de Von Neumann este acela că nu e suficient ca un constructor universal să producă pur și simplu o copie a lui însuși. Trebuie să reproducă și *instrucțiunile* pentru crearea unui constructor universal și să le insereze în copia nou creată. Altfel, vlăstarul constructorului universal ar fi steril. Astăzi, instrucțiunile robotice programate într-un computer care conduce robotul, dar pentru a înțelege mai bine logica mecanismelor autoreproducătoare ar trebui să ne gândim la instrucțiunile imprimate pe o bandă perforată, precum cea folosită de o pianolă (care e totodată mai apropiată de

Scanned with OKEN Scanner

conceptul benzii din maşina Turing). Să ne imaginăm că acest constructor universal e alimentat cu o bandă perforată care îi spune cum să facă un lucru sau altul şi că maşina îndeplineşte orbeşte instrucţiunile de pe bandă. Printre toate benzile posibile, fiecare cu propriile orificii strategic amplasate, va exista una cu un tipar de orificii care conţine instrucţiunile pentru construirea chiar a constructorului universal. Banda va trece prin mecanism, iar constructorul universal va crea un alt constructor universal. Dar, aşa cum am spus, nu e suficient. Constructorul-mamă trebuie să facă acum o copie a *benzii de instrucţiuni*. Pentru asta, banda trebuie tratată acum nu ca un set de instrucţiuni, ci ca un alt obiect fizic care va fi copiat. În jargon modern, banda trebuie să-şi schimbe statutul din software (instrucţiuni) în hardware (un material cu un anumit tipar de orificii). Von Neumann şi-a imaginat un fel de unitate de supraveghere care să realizeze transformarea, adică să modifice starea din hardware în software şi invers, în funcţie de circumstanţe. În actul final al piesei, banda de instrucţiuni copiată orbeşte e adăugată la noul constructor universal pentru a completa ciclul. Intuiţia crucială a lui Von Neumann a fost că informaţia de pe bandă trebuie tratată în două moduri distincte: (1) ca *instrucţiuni* active care să-i spună constructorului universal să producă ceva şi (2) ca *date* pasive ce trebuie pur şi simplu copiate pe măsură ce banda este reprodusă.

Viaţa reflectă acest rol dublu al informaţiei. În funcţie de situaţie, ADN-ul este atât un obiect fizic, cât şi un set de instrucţiuni. Când o celulă îşi vede de viaţă şi are nevoie de o proteină oarecare pentru a îndeplini o funcţie, instrucţiunile pentru construirea proteinei relevante sunt citite din ADN, iar proteina este creată de un ribozom. În această situaţie, ADN-ul acţionează ca software. Dar când vine momentul replicării şi diviziunii celulare, se întâmplă ceva diferit. O serie de enzime speciale copiază orbeşte ADN-ul (împreună cu erorile acumulate), astfel încât, în urma diviziunii, fiecare celulă are la dis-

Scanned with OKEN Scanner

poziție câte o copie.* Prin urmare, organizarea logică a unei celule vii o reflectă îndeaproape pe cea a mecanismului autoreplicator al lui Von Neumann. Nu știm însă care e echivalentul biologic al unității de supraveghere ce determină momentul de transformare a instrucțiunilor în date pasive. În celulă nu există nici o componentă clară, nici un organit special care să joace rolul de „strateg" și să-i spună celulei cum să privească ADN-ul (ca software sau hardware) în fiecare clipă. Decizia de replicare depinde de un număr mare de factori din toată celula și mediul ei: nu are o sursă unică. E un exemplu de control epigenetic, care presupune cauzalitate de sus în jos,[5] un subiect pe care îl voi discuta în detaliu mai jos.

Von Neumann și-a dat seama că replicarea din biologie e foarte diferită de o simplă copiere. Până la urmă, cristalele cresc prin copiere. Replicarea biologică e nontrivială datorită capacității sale de a evolua. Dacă procesul de copiere conține greșeli, iar erorile sunt și ele copiate, atunci procesul de replicare poate evolua. Erorile ce pot fi moștenite sunt, bineînțeles, catalizatorul evoluției darwiniene. Pentru ca o mașină Von Neumann să poată oglindi biologia, trebuie să aibă cele două proprietăți fundamentale: autoreplicarea și posibilitatea de a evolua.

Ideea mașinilor Von Neumann a pătruns în lumea științifico-fantasticului și au dat naștere unor curente alarmiste. Închipuiți-vă că un savant nebun ar reuși să construiască un astfel de mecanism și să-l elibereze în mediul înconjurător.

---

* Ca de obicei, lucrurile sunt puțin mai complicate, pentru că și citirea, și replicarea pot avea loc în același timp, uneori în aceeași regiune, existând riscul de accidente în trafic. Pentru a reduce haosul potențial la minimum, genomurile organizează lucrurile astfel încât ARN- și ADN-polimerazele să se deplaseze în sensuri diferite. Conform teoriei lui Von Neumann, asta înseamnă că viața se asigură că banda se deplasează într-un singur sens când sistemul are nevoie să fie și hardware, și software în același timp.

Scanned with OKEN Scanner

Având la dispoziție o rezervă de materii prime, mașinăria nu va face decât să se reproducă la nesfârșit, luând lucrurile de care are nevoie până când epuizează rezervele. Odată trimise în spațiu, mașinile Von Neumann ar putea devasta galaxia și ce se află dincolo de ea. Bineînțeles, celulele vii sunt, de fapt, un fel de mașini Neumann și știm că un prădător dezlănțuit poate decima un ecosistem dacă se înmulțește necontrolat. Biologia terestră este însă plină de limitări generate de rețeaua complexă a vieții, cu numărul său uriaș de organisme interdependente, dar diferite, astfel încât pagubele pe care le poate provoca o multiplicare necontrolată sunt mărginite. Însă un prădător interstelar singuratic care se replică la nesfârșit poate fi o cu totul altă poveste.

Viața ca joc

Deși nu a încercat să construiască un mecanism autoreproducător fizic, von Neumann a conceput un model matematic inteligent care surprinde ideea esențială. E cunoscut drept automatul celular (AC) și reprezintă un instrument popular de investigare a legăturii dintre informație și viață. Cel mai faimos exemplu de AC este numit (foarte potrivit, de altfel) „Jocul vieții", inventat de matematicianul John Conway, care poate fi jucat pe ecranul unui computer. Trebuie să insist asupra faptului că Jocul vieții e foarte diferit de biologia reală, iar cuvântul „celular" din sintagma automat celular nu are vreo legătură cu celulele vii: e doar o coincidență terminologică nefericită (o celulă de închisoare ar fi o analogie mai apropiată). Motivul pentru care studiem automatele celulare e acela că, în ciuda legăturii fragile cu biologia, ele surprind ceva profund despre *logica* vieții. Deși simplu, acest joc cuprinde o serie de proprietăți uluitoare și de mare impact. Nici nu-i de mirare că în jurul lui s-a format un fel de cult: oamenilor le place să-l joace, chiar să-l ritmeze după muzică, matematicienii îi explo-

Scanned with OKEN Scanner

rează proprietățile ascunse, iar biologii îl sondează pentru a găsi indicii despre arhitectura fundamentală a vieții.

Iată cum funcționează jocul. Avem în față o grilă, precum o tablă de șah sau ecranul unui computer. Fiecare pătrat din grilă poate fi umplut sau nu. Pătratele umplute sunt „vii", iar cele goale sunt „moarte". Se începe cu un tipar oarecare de pătrate vii și moarte (poate fi orice configurație). Ca să se întâmple ceva, trebuie stabilite reguli care să schimbe tiparul. Fiecare pătrat are opt pătrate învecinate. Într-un AC simplu, un pătrat dat își schimbă starea (viu sau mort) în funcție de starea celor din vecinătatea sa. Iată regulile alese de Conway:

1. Oricare celulă vie cu mai puțin de doi vecini vii moare de pe urma subpopulării.
2. Oricare celulă vie cu doi sau trei vecini vii trăiește până la generația următoare.
3. Oricare celulă vie cu mai mult de trei vecinii vii moare de pe urma suprapopulării.
4. Oricare celulă moartă cu exact trei vecini vii devine o celulă vie în urma reproducerii.

Regulile sunt aplicate simultan fiecărui pătrat din grilă, iar tiparul (în general) se schimbă, adică e „actualizat". Regulile se aplică în mod repetat, fiecare pas însemnând „o generație". Apar tipare schimbătoare cu un efect destul de hipnotizant. Adevăratul scop al jocului nu e acela de a ne distra sau de a ne încânta estetic, ci reprezintă un instrument pentru studierea complexității și fluxului de informație dintre forme. Uneori, tiparele de pe ecranul unui computer par să prindă viață proprie, se mișcă în mod coerent sau se ciocnesc și creează noi forme din rămășițe. Un exemplu popular se cheamă „planorul", un grup de cinci pătrate umplute care se mișcă pe ecran printr-un fel de rostogolire (vezi figura 8). E surprinzător că o

Scanned with OKEN Scanner

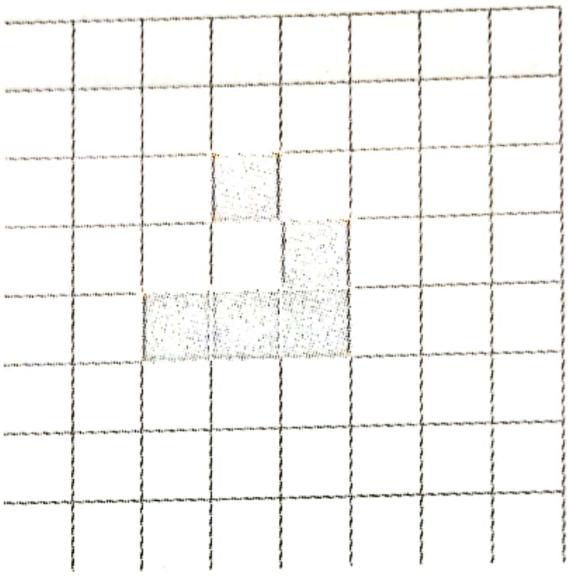


Figura 8 Jocul vieții. Când evoluează pas cu pas conform regulilor lui Conway, modelul creat de pătratele pline alunecă pe ecran fără să-și schimbe configurația internă. Această configurație își va continua drumul în același fel până se va ciocni de alte pătrate umplute.

complexitate atât de captivantă poate apărea din aplicarea repetată a unor reguli simple.*

Pornind de la un tipar inițial aleatoriu, în cadrul jocului se pot întâmpla mai multe lucruri. Tiparele pot să evolueze și să se schimbe o vreme, dar, în cele din urmă, dispar, lăsând ecranul alb; pot să rămână blocate în forme statice sau să treacă printr-un ciclu format din aceleași forme. Mai interesante sunt situațiile în care se desfășoară la nesfârșit, generând tipare mereu noi, la fel ca în biologia reală. Cum putem ști dinainte care tipare vor genera varietate nelimitată? Se dovedește că, în general, nu putem ști. Tiparele nu sunt arbitrare, dar se supun unor reguli superioare proprii. S-a dovedit că tiparele pot implementa operațiuni logice de bază în cadrul propriului com-

* Iar aici apare o întrebare profundă despre natura vieții. Cu toții suntem de acord că viața e complexă, dar oare complexitatea ei e produsul unui *proces* complex, sau e rezultatul unor procese simple succesive, ca în Jocul vieții? Îi sunt recunoscător Sarei Walker că a insistat asupra distincției dintre proces complex și stare complexă.

Scanned with OKEN Scanner

portament. Ele sunt un computer în interiorul unui computer. Astfel, *tiparele* pot reprezenta o mașină Turing sau un computer universal, chiar dacă unul lent. Din pricina acestei proprietăți, analiza indecidabilității realizată de Turing poate fi aplicată direct în cazul Jocului vieții. Concluzie: nu avem nici un mod sistematic prin care să decidem în avans dacă un tipar inițial va dispărea sau se va desfășura la nesfârșit.[6]

Încă mi se pare tulburător că tiparele de pe ecranul unui calculator se pot elibera de substrat, creând un univers propriu precum în filmul *Matrix*, dar supunându-și în continuare mișcările regulilor de fier ale logicii. Puterea indecidabilității gödeliene este de așa natură încât restricțiile logicii sunt compatibile cu crearea unor elemente noi și imprevizibile. Însă Jocul vieții ridică niște întrebări serioase cu privire la cauză și efect. Chiar putem trata formele de pe ecran drept „lucruri" care „produc" evenimente, cum ar fi resturile dezordonate ale ciocnirilor? Aceste forme nu sunt, până la urmă, obiecte fizice, ci tipare *informaționale*. Tot ce li se întâmplă poate fi explicat la nivelul inferior al programului informatic. Însă indecidabilitatea fundamentală inerentă sistemului ne spune că e loc pentru ordine emergentă. Evident, la nivelul formelor pot fi formulate reguli de interacțiune situate la un nivel informațional superior. Probabil ceva de genul acesta se petrece în viață (și în conștiință), unde firul narativ cauzal poate fi aplicat tiparelor de informație *independent de substratul fizic*.

Cu toate că e tentant să considerăm că formele din Jocul vieții sunt „lucruri" cu un fel de existență independentă care se supun anumitor reguli, rămânem cu o întrebare profundă: în ce sens se poate spune că o ciocnire dintre două forme „conduce la" apariția alteia? Joseph Lizier și Mihail Prokopenko de la Universitatea din Sidney au încercat să stabilească diferența dintre simpla corelare și cauzalitatea fizică efectuând o analiză atentă a automatelor celulare, inclusiv a Jocului vieții.[7] Cei doi au tratat informația care curge printr-un sistem cu situația în

Scanned with OKEN Scanner

care torni vopsea într-un râu și o cauți apoi în aval. Locul în care se duce vopseaua e „influențat cauzal" de ce se întâmplă în punctul în care e turnată în râu. Sau, ca să folosim altă imagine, dacă A are efect cauzal asupra lui B înseamnă că (metaforic vorbind), dacă îl scuturăm pe A, puțin mai târziu se va scutura și B. Însă Lizier și Prokopenko au observat și existența a ceva ce ei numesc „transfer predictiv de informație", care se petrece dacă simplul fapt de *a ști ceva* despre A ne ajută să știm mai bine ce ar putea face B ulterior, chiar dacă nu există vreo legătură fizică directă între A și B.* Am putea spune că atât comportamentul lui A, cât și comportamentul lui B sunt corelate printr-un tipar de informație care se bucură de propria dinamică. Concluzia e că tiparele de informație chiar formează unități cauzale și se combină pentru a crea o lume de activitate emergentă cu propriul ei fir narativ. Deși pare o afirmație neobișnuită, în viața de zi cu zi ne folosim de aceeași premisă. De exemplu, știm foarte bine că, pe măsură ce îmbătrânesc, oamenii tind să aibă opinii și gusturi tot mai conservatoare. Cu toate că nu e deloc o lege a naturii, constituie o trăsătură fundamentală a naturii umane și noi toți considerăm că „natura umană" e un lucru sau o proprietate reală, chiar dacă știm că gândurile și acțiunile omenești sunt, până la urmă, dirijate de un creier supus legilor fizicii.

---

* Corelația fără cauzalitate nu e un mister. Să vă dau un exemplu simplu. Să zicem că îi trimit prietenei mele Alice, din Londra, un e-mail cu parola unui cont secret, pe care ea îl accesează imediat, iar câteva clipe mai târziu îi trimit același mesaj lui Bob, din New York, care face același lucru. Un spion care ne supraveghează ar putea trage concluzia eronată că Alice i-a dat lui Bob parola, adică informația despre parolă a ajuns de la Londra la New York, stabilind astfel o legătură cauzală între Alice și Bob. Însă, de fapt, informația lui Alice și informația lui Bob sunt corelate nu pentru că una a provocat-o pe alta, ci pentru că ambele au fost provocate de un terț comun (eu). Putem cădea foarte ușor în capcana confundării corelației cu cauzalitatea.

Scanned with OKEN Scanner

Automatele celulare pot fi generalizate în multe feluri. De exemplu, legile lui Conway sunt „locale“ (îi implică doar pe cei mai apropiați vecini). Însă regulile non-locale, în care un pătrat e actualizat în funcție de, să spunem, vecinii aflați și la două căsuțe distanță, pot fi introduse cu ușurință. La fel și regulile de actualizare asincronă, prin care diferite pătrate sunt actualizate în ritmuri diferite. O altă generalizare e cea care le permite pătratelor să adopte mai mult de două stări, adică să nu fie numai „vii“ sau „moarte“. Să nu uităm că scopul principal al lui Von Neumann era să construiască un automat celular care să se reproducă și să evolueze. Jocul vieții inventat de Conway e clar că poate evolua, dar se poate și autoreproduce? Sigur că da. La data de 18 mai 2010, Andrew J. Wade, pasionat de Jocul vieții, a anunțat că a descoperit un tipar (numit acum Gemini) care se reproduce singur după 34 de milioane de generații. La data de 23 noiembrie 2013, un alt fan al jocului, Dave Greene, a anunțat că obținuse primul replicator care creează o copie perfectă a lui însuși, inclusiv echivalentul crucialei benzi de instrucțiuni propuse de Von Neumann. Aceste rezultate tehnice pot părea seci, dar e important să înțelegem că proprietatea autoreplicării reflectă un aspect extrem de special al logicii jocului. Nu același lucru s-ar întâmpla în cazul unui set arbitrar de reguli automate, indiferent câți pași ar fi executați.

În lumina acestor lucruri, ajungem la o importantă întrebare științifică căreia încă nu i s-a găsit răspuns și care decurge din cercetarea lui von Neumann. Care e nivelul *minim* de complexitate necesar pentru a obține cele două trăsături gemene: replicarea non-trivială și evoluția nedeterminată? Dacă pragul complexității e scăzut, ne putem aștepta ca viața să apară ușor și să fie larg răspândită în cosmos. Dacă e foarte ridicat, atunci viața pe Pământ poate fi o excepție, un rezultat accidental al unei serii de evenimente improbabile. Fără îndoială că automatul celular propus de Von Neumann era destul de complex,

Scanned with OKEN Scanner

fiecărui pătrat fiindu-i asociată o stare din cele 29 posibile. Jocul vieții e mult mai simplu, dar necesită resurse computaționale uriașe și încă e intimidant de complex. Totuși, acestea sunt doar câteva exemple calculate, iar acest domeniu e încă subiectul unor cercetări intense. Deocamdată, nimeni nu știe care e complexitatea minimă necesară pentru modelul de automat celular al unei mașini Von Neumann, și cu atât mai puțin cea necesară pentru un constructor universal *fizic* alcătuit din molecule.

De curând, colegele mele Alyssa Adams și Sara Walker au introdus un nou element în teoria automatelor celulare. Spre deosebire de Jocul vieții, care se desfășoară într-un aranjament bidimensional de celule, Adams și Walker au folosit un șir unidimensional de celule. La fel ca înainte, celulele pot fi pline sau goale. Se începe cu un tipar arbitrar de căsuțe umplute și se evoluează pas cu pas folosind o regulă de actualizare (vezi figura 9). Timpul curge de sus în jos în figură: fiecare linie orizontală reprezintă starea automatului celular în acel moment temporal, conform rezultatului obținut din rândul anterior prin aplicarea regulii. Aplicările succesive generează tiparul. Matematicianul Stephen Wolfram a realizat un studiu exhaustiv al automatelor celulare unidimensionale: există 256 de reguli de actualizare posibile care iau în calcul doar cele mai apropiate căsuțe învecinate. La fel ca în cazul Jocului vieții, unele tipare sunt plictisitoare: de exemplu, se blochează într-o stare sau într-un ciclu în care se repetă aceleași câteva stări. Însă Wolfram a descoperit că există câteva reguli care generează o complexitate mult mai mare. Figura 10 ne arată un astfel de exemplu: în acest caz, s-a folosit regula 30 a lui Wolfram și s-a pornit de la o singură căsuță. Putem compara caracterul regulat din figura 9 (care folosește regula 90) cu structura elaborată a figurii 10 (care folosește regula 30).

Adams și Walker voiau să găsească o cale de a face din automatul celular o reprezentare mai realistă a biologiei introdu-

Scanned with OKEN Scanner

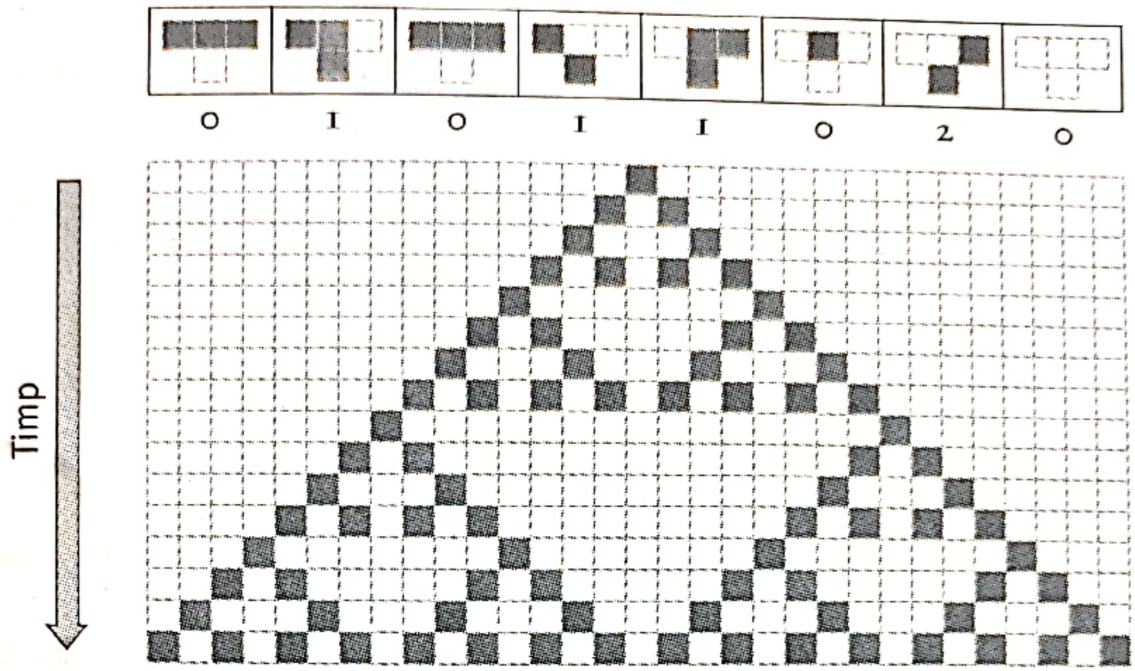


Figura 9 Automat celular unidimensional (elementar) bazat pe regula 90 a lui Wolfram. Caseta lungă de deasupra arată structura regulii. Începând cu o singură căsuță umplută din mijlocul primului rând al automatului, tiparul de sub casetă e generat prin aplicarea regulii în mod repetat pentru fiecare pătrat în parte. De exemplu, în pasul inițial (rândul cel mai de sus), pătrățelul umplut corespunde tiparului din caseta A (cu pătratele învecinate goale), astfel încât pătratul se schimbă din plin în gol la următorul pas

când un mediu înconjurător schimbător. Astfel, au cuplat două automate celulare (computațional vorbind): un automat celular reprezenta organismul, celălalt, mediul. Apoi au introdus ceva ce se abate fundamental de la modelele convenționale de automate celulare: au permis regulii de actualizare a „organismului" să se *schimbe*. Pentru a determina care dintre cele 256 de reguli trebuie aplicată la fiecare pas, au grupat celulele din automatul celular ce reprezenta „organismul" în triplete adiacente (adică 000, 010, 110 etc.) și au comparat frecvența relativă a fiecărei triplete cu aceleași tipare din automatul celular ce reprezenta „mediul". (Dacă explicația vi se pare prea tehnică, nu vă faceți griji: nu contează detaliile, ci ideea generală că introducerea unor reguli non-locale poate reprezenta o

Scanned with OKEN Scanner

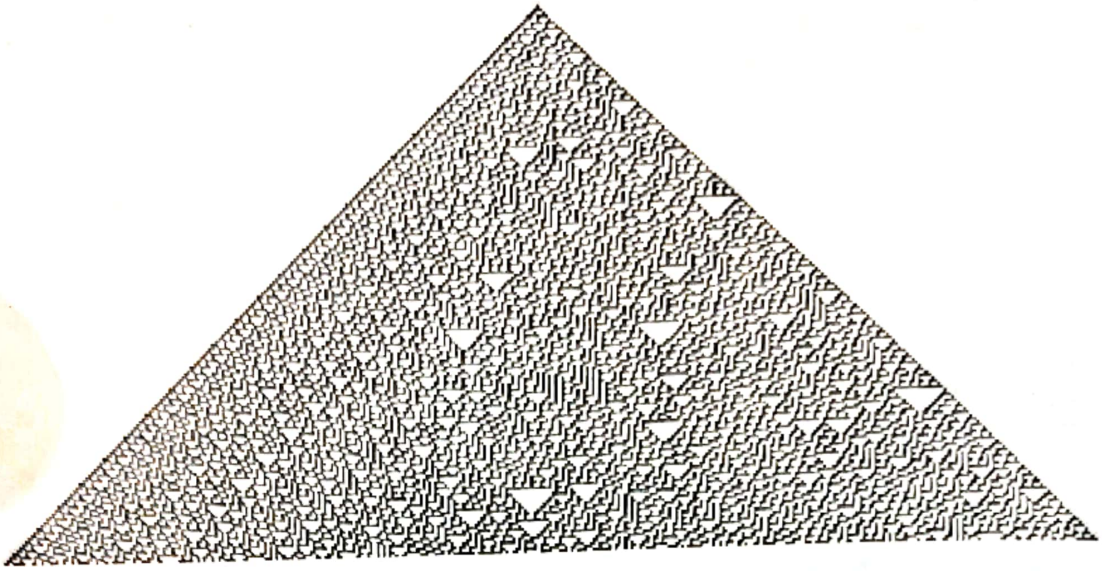


Figura 10 Evoluția complexității într-un automat celular bazat pe regula 30.

modalitate puternică de a genera forme noi de complexitate.) Prin urmare, acest aranjament schimbă regula de actualizare ca funcție atât a stării „organismului" însuși (făcându-l autoreferențial), cât și a „mediului" (făcându-l un sistem deschis). Folosindu-se de un computer, Adams și Walker au făcut mii de studii de caz pentru a găsi tipare interesante. Voiau să identifice comportamente evolutive care sunt nedeterminate (adică nu revin ciclic la starea inițială) și inovatoare. În contextul de față, inovația înseamnă că secvența de stări studiată nu s-ar putea întâmpla niciodată în *nici una* dintre cele 256 de automate celulare cu reguli fixe posibile, chiar și luând în considerare toate stările inițiale posibile. S-a dovedit că un astfel de comportament e rar, dar există câteva exemple foarte clare. A necesitat mult timp de calcul, dar au descoperit suficiente încât să fie convinse că, până și în cadrul acestui model simplu, *dinamica dependentă de stare* oferă noi căi către complexitate și varietate.[8]

Cercetările lor arată foarte limpede că simpla procesare a biților de informație nu e suficientă. Pentru a surprinde întreaga bogăție a biologiei, trebuie să evolueze până și regulile

Scanned with OKEN Scanner

de procesare a informației. Voi reveni asupra acestui subiect important în epilog.

Poate un biolog să repare un radio?

Indiferent care e complexitatea minimă necesară pentru apariția vieții, nu există nici un dubiu că până și cea mai simplă formă de viață cunoscută e deja extraordinar de complexă. Complexitatea vieții e atât de mare încât e tentant să renunțăm la încercarea de a o mai înțelege în termeni fizici. Poate că un fizician e capabil să ne descrie un atom de hidrogen, poate chiar și o moleculă de apă, dar ce șanse are să ne descrie o bacterie în aceiași termeni?

În urmă cu o generație sau două, viitorul părea mult mai luminos. După s-a elucidat structura ADN-ului și s-a descifrat codul genetic universal, biologia a fost cuprinsă de un avânt reducționist. A existat tendința de a considera că răspunsurile multor întrebări din domeniul biologiei puteau fi găsite la nivelul genelor, un punct de vedere exprimat elocvent de Richard Dawkins prin conceptul de genă egoistă.[9] Nu încape îndoială că reducționismul aplicat în biologie a avut un succes notabil. De exemplu, anumite gene defectuoase au fost corelate cu mai multe boli ereditare, precum sindromul Tay-Sachs. Însă cercetătorii și-au dat foarte repede seama că, în general, nu există o legătură simplă între o genă sau un grup de gene și o trăsătură biologică de la nivelul întregului organism. Multe trăsături sunt rezultatul acțiunii întregului sistem, inclusiv a unor mari rețele de gene care interacționează, plus mulți factori non-genetici (sau epigenetici), printre care se poate număra și mediul înconjurător (un subiect la care voi reveni în capitolul următor). Iar când vine vorba de organisme sociale (de exemplu, furnici, albine și oameni), o descriere completă presupune abordarea organizării colective a întregii comunități. Pe măsură ce oamenii de știință s-au gândit mai bine la

Scanned with OKEN Scanner

aceste argumente, biologia a început să pară din nou imposibil de complexă.

Dar poate că nu e totul pierdut. Partea bună a reducționismului e emergența, adică recunoașterea faptului că noi calități și principii pot apărea la niveluri ridicate de complexitate, calități care pot fi relativ simple și înțelese fără prea multe cunoștințe despre nivelurile inferioare. Emergența a căpătat o aură aproape mistică, dar, în realitate, a jucat întotdeauna un rol în știință. Un inginer poate înțelege pe deplin proprietățile grinzilor de oțel fără să cunoască în detaliu structura cristalină a metalelor. Un fizician poate studia tipare ale celulelor de convecție fără să știe nimic despre forțele dintre moleculele de apă. Așadar, poate „simplificarea prin emergență" să funcționeze și în biologie?

Abordând tocmai această chestiune, biologul rus Iuri Lazebnik a scris un eseu umoristic intitulat „Poate un biolog să repare un radio?"[10] Asemenea receptoarelor radio, celulele sunt capabile să detecteze semnale externe care determină reacții corespunzătoare. Iată un exemplu: moleculele cu factor de creștere epidermic (FCE) pot fi prezente în țesuturi și se pot lega de moleculele receptoare de la suprafața unei anumite celule. Receptorul se așază pe membrana celulară și comunică cu moleculele din interiorul celulei. Lipirea FCE declanșează o cascadă în interiorul celulei, proces care se încheie prin expresie genică modificată și producție proteică, ceea ce, în acest caz, conduce la proliferarea celulei. Lazebnik a observat că radioul cu tranzistor al soției sale este la rândul său un dispozitiv de transducție (transformă undele radio în sunet) și, având sute de componente, e la fel de complex ca un mecanism de transducție a semnalelor dintr-o celulă.

Radioul soției lui Lazebnik se stricase și trebuia reparat. Lazebnik s-a întrebat cum ar putea un biolog adept al reducționismului să abordeze problema. Ei bine, primul pas ar fi să obțină un număr mare de radiouri similare și să se uite în fie-

Scanned with OKEN Scanner

care dintre ele, observând diferențele și catalogând componentele în funcție de culoare, formă, dimensiune ș.a.m.d. Apoi, biologul ar putea încerca să îndepărteze câteva elemente sau să le înlocuiască între ele și să observe rezultatele. Despre rezultatele obținute s-ar putea publica sute de articole elaborate, unele dintre ele surprinzătoare sau contradictorii. S-ar decerna premii și acorda patente. Anumite componente ar fi considerate esențiale, altele nu. Eliminarea părților esențiale ar face ca radioul să se oprească definitiv. Alte componente ar afecta doar calitatea sunetului în moduri complexe. Întrucât într-un radio cu tranzistori obișnuit există zeci de componente diferite legate între ele prin diverse tipare, aparatul ar putea fi considerat „foarte complex" și poate chiar imposibil de înțeles de către oamenii de știință, dat fiind numărul de variabile implicate în funcționarea lui. Toată lumea ar fi însă de acord că e nevoie de mult mai mulți bani pentru continuarea investigațiilor.

În acest program de cercetare extins, o direcție bună ar fi folosirea microscoapelor puternice pentru căutarea indiciilor din *interiorul* tranzistorilor și al altor componente până la nivel atomic. Un astfel de studiu impresionant ar putea să dureze decenii și să coste o avere; și ar putea fi, bineînțeles, util. Însă ceea ce Lazenbik descrie în satira sa cu radioul este exact abordarea folosită într-o mare parte a biologiei moderne. Ideea esențială pe care autorul a vrut s-o exprime e că un *inginer electronist* sau chiar un tehnician bine pregătit ar repara foarte ușor radioul defect din simplul motiv că persoana respectivă ar cunoaște foarte bine *principiile circuitelor electrice*. Cu alte cuvinte, dacă înțelegem cum funcționează radiourile și cum sunt conectate între ele componentele pentru a obține funcții bine definite, sarcina de reparare a unui model defect devine foarte simplă. Efectuând cu atenție câteva manevre, muzica începe să se audă din nou din aparat. Lazenbik deplânge faptul că biologia nu a atins acest nivel de înțelegere și că doar puțini

Scanned with OKEN Scanner

biologi abordează viața în astfel de termeni, adică în termeni de celule vii ce conțin module care au anumite funcții logice și sunt „conectate între ele" la nivel chimic pentru a forma rețele cu feedback, cu feedforward, cu amplificare, cu transducție și cu alte funcții de control în vederea atingerii unei funcționalități colective. Ideea principală este cea potrivit căreia, în multe cazuri, *nu e necesar* să știm ce se petrece în *interiorul* modulelor pentru a înțelege ce se întâmplă cu întregul sistem.

Din fericire, vremurile se schimbă. Însăși noțiunea de viață e reconceptualizată într-o manieră care seamănă îndeaproape cu domeniile electronicii și informaticii. Un manifest vizionar în favoarea unui sistem viitor al biologiei a fost publicat în *Nature* în 2008 de către biologul laureat al Premiului Nobel Paul Nurse, care avea să devină în scurt timp președinte al Societății Regale. Într-un articol intitulat „Life, logic and information", Nurse anunța o nouă eră în biologie.[11] El observa că oamenii de știință caută tot mai mult să cartografieze procese moleculare și biochimice sub forma echivalentului biologic al plăcilor de circuite electronice:

> Dacă ne concentrăm asupra fluxului de informații, ne va fi mai ușor să înțelegem cum funcționează celulele și organismele. [...] Trebuie să descriem interacțiunile moleculare și transformările biochimice, iar apoi să traducem aceste descrieri în circuite logice care dezvăluie cum e gestionată informația. [...] E nevoie de două etape pentru a duce așa ceva la bun sfârșit: să descriem și să catalogăm circuitele logice care gestionează informația din celule și să simplificăm analiza biochimiei celulare astfel încât să poată fi pusă în legătură cu circuitele logice. [...] O analogie care ne ajută e circuitul electric. Reprezentările acestor circuite folosesc simboluri pentru a defini natura și funcția componentelor electrice folosite. Ele descriu totodată relațiile logice dintre componente, explicând felul în care informația curge prin circuit. O conceptualizare similară e necesară în cazul modulelor logice ce compun circuitele care gestionează informația din celule.

Scanned with OKEN Scanner

Filozofii și oamenii de știință continuă să aibă dispute cu privire la faptul dacă, „în principiu", toate fenomenele biologice ar putea fi reduse la activitatea atomilor, însă există consensul potrivit căruia, din punct de vedere practic, are mult mai mult sens să căutăm explicații la niveluri superioare. În electronică, un instrument poate fi proiectat și asamblat perfect din componente standard (tranzistori, condensatoare, transformatoare, fire etc.) fără ca persoana care îl concepe să se intereseze de procesul exact care are loc în fiecare componentă la nivel atomic. Nu e obligatoriu să știm cum *funcționează* o componentă, ci doar *ce face*. Această abordare practică devine deosebit de puternică atunci când circuitul electric procesează informație sub orice formă (transducția semnalului, rectificare sau amplificare, sau în calitate de componentă a unui computer), deoarece, într-un astfel de caz, descrierea se poate face numai în termeni de flux al informației și software, fără vreo trimitere la hardware sau modul, și cu atât mai puțin la părțile sale moleculare. În mod analog, ne atrage atenția Nurse, ar trebui să căutăm, acolo unde e posibil, explicații despre procesele din interiorul celular și dintre celule pornind de la proprietățile informaționale ale unităților superioare.

Când ne uităm la ființele vii, le vedem corpul material. Dacă le sondăm interiorul, descoperim organe, celule, organite subcelulare, cromozomi și chiar (cu ajutorul echipamentelor performante) molecule. Nu vedem, în schimb, informația. Nu vedem tiparele de informație care se desfășoară în circuitele creierului. Nu vedem armata de motoare informaționale demonice din celule și nici cascadele organizate compuse din celule de semnalizare care-și execută neobositul dans. Și nu vedem nici informațiile aglomerate la nivelul ADN-ului. Vedem doar lucruri concrete, nu biți. Avem acces doar la jumătate din povestea vieții. Dacă am putea vedea lumea prin „ochii informației", tiparele informaționale dinamice care caracterizează viața ne-ar sări în ochi ca un lucru bizar. Îmi pot imagina o

Scanned with OKEN Scanner

inteligență artificială a viitorului conectată la lumea informației care e antrenată să recunoască oamenii nu după chip, ci după arhitectura informațională din creierul lor. Fiecare persoană poate avea un tipar propriu de identificare, ca în cazul aurelor din pseudoștiință. E important de reținut că tiparele de informație din lucrurile vii nu sunt aleatorii, ci au fost sculptate de evoluție pentru adaptare optimă, la fel ca anatomia și fiziologia.

Bineînțeles, oamenii nu pot percepe informația în mod direct, ci doar structurile materiale în care e cuprinsă, rețelele în care curge, circuitele chimice care leagă părțile întregului. Dar asta nu scade importanța informației. Închipuiți-vă dacă am încerca să înțelegem cum funcționează un computer doar prin studierea componentelor sale electrice. Am putea să ne uităm cu microscopul la microcip, să studiem schema electrică în detaliu și să investigăm sursa de electricitate. Însă tot nu am ști, de pildă, cum funcționează programul Windows. Pentru a înțelege în profunzime ce apare pe ecranul computerului trebuie să consultăm un programator, cineva care scrie coduri informatice pentru a crea funcționalitate, coduri menite să organizeze biții de informație care gonesc prin circuite. Tot așa, pentru a explica pe deplin viața trebuie să-i înțelegem atât hardware-ul, cât *și* software-ul, adică organizarea moleculară *și* organizarea informațională.

Circuite biologice și muzica vieții

Cartografierea circuitelor vieții este un domeniu aflat încă la începuturi și reprezintă o parte a biologiei sistemelor. Circuitele electrice au componente pe care fizicienii le înțeleg bine. Echivalentul lor biologic nu e la fel de bine înțeles. Multe circuite chimice sunt controlate de gene „conectate" prin căi chimice pentru a crea trăsături de tip feedback și feedforward, noțiuni cunoscute din automatică, dar ale căror amănunte

Scanned with OKEN Scanner

devin problematice. Ca să vă faceți o idee, dați-mi voie să mă concentrez asupra unei proprietăți fundamentale a vieții: reglarea producerii de proteine. Organismele își monitorizează în mod inteligent mediul și reacționează la ce se întâmplă. Până și bacteriile detectează schimbările din jurul lor, procesează informația și implementează instrucțiunile necesare pentru a-și modifica starea în vederea obținerii unui avantaj. În principal, alterarea implică accentuarea sau reducerea producerii anumitor proteine. Producerea cantității corecte dintr-o anumită proteină e o chestiune foarte fin echilibrată și trebuie reglată cu grijă. O cantitate prea mare poate fi toxică, iar o cantitate prea mică poate însemna moarte prin înfometare. Cum stabilește o celulă *cantitatea* necesară de proteină într-un moment sau altul? Răspunsul îl aflăm studiind un grup de molecule (ele însele proteine) cunoscute sub numele de factori de transcriere, care au forme distinctive ce recunosc segmente specifice de ADN și se lipesc de ele. Astfel legate, ele cresc sau scad ritmul în care e exprimată o genă din apropiere.

Merită să înțelegem exact cum fac asta. Mai sus (pagina 82), am discutat despre o moleculă numită ARN-polimerază, a cărei misiune e să se deplaseze de-a lungul ADN-ului și să „citească" secvența, creând din mers molecula-pereche de ARN. Însă ARN-polimeraza nu face acest lucru la întâmplare, ci așteaptă un semnal de genul: „E nevoie de proteina mea! Transcrie-mă acum!" La începutul genei există o regiune de ADN care dă semnalul. E numită promotor, pentru că promovează procesul de transcriere. ARN-ul e atras spre promotor și se va lega de el pentru a începe transcrierea. Însă ARN-ul se va lipi de promotor numai dacă ultimul e „pornit". Aici intră în acțiune factorii de transcriere. Lipindu-se de regiunea promotor, un factor de transcriere dat o poate bloca, împiedicând astfel manevra de andocare a ARN-ului. În acest rol, din motive evidente, factorul de transcriere poartă numele de represor. Totul e în regulă dacă nu e nevoie de proteină. Dar ce se întâmplă dacă

Scanned with OKEN Scanner

se schimbă condițiile și gena blocată trebuie exprimată? Desigur, molecula represor care o blochează trebuie îndepărtată cumva. Dar cum funcționează *acest* pas?

Un bun exemplu descoperit cu mult timp în urmă e un mecanism folosit de bacteria *E. coli*. Glucoza e hrana favorită a bacteriei, dar dacă nu are la dispoziție glucoză, acest microb versatil se poate descurca metabolizând un alt zahăr, numit lactoză. Pentru a realiza schimbarea, bacteria are nevoie de trei proteine speciale, proteine care depind de exprimarea a trei gene adiacente. Ar fi o risipă ca genele respective să fie ținute active doar ca plan de rezervă, astfel că *E. coli* are un circuit chimic care reglează funcția de activare și dezactivare a genelor necesare. Când există glucoză din belșug, un factor de transcriere inhibitor se lipește de regiunea promotor a ADN-ului, aproape de cele trei gene, și împiedică ARN-polimeraza să se lipească și să înceapă procesul de transcriere a respectivelor gene. Genele rămân neactivate. Când glucoza nu e disponibilă, dar există lactoză, un produs secundar al lactozei se lipește de molecula inhibitor și o dezactivează, permițând ARN-polimerazei să se atașeze de ADN și să-și îndeplinească misiunea. Apoi, cele trei gene-cheie sunt exprimate și începe metabolizarea lactozei. Există și un mecanism care oprește din nou genele de lactoză atunci când glucoza e iarăși disponibilă din belșug.

În total, *E. coli* are aproximativ 300 de factori de transcriere care să regleze producția celor 4.000 de proteine ale sale. Am descris o funcție inhibitor, dar alte aranjamente chimice fac în așa fel încât alți factori de transcriere să joace rol de activatori. În unele cazuri, același factor de transcriere poate activa mai multe gene sau poate activa câteva blocându-le pe altele. Aceste variante diferite pot crea o varietate bogată de funcții.[12] (Prin comparație, oamenii au aproximativ 1.400 de factori de transcriere pentru cele 20.000 de gene ale lor.)[13]

Scanned with OKEN Scanner

CASETA 6: CUM CALCULEAZĂ CELULELE

Factorii de transcriere își pot combina activitățile pentru a crea diverse funcții logice similare celor din electronică și informatică. Să luăm, de exemplu, funcția ȘI, unde un comutator Z e pornit numai dacă primește semnal de la comutatoarele X și Y simultan. Ca să implementăm acest proces, un semnal chimic schimbă factorul de transcriere X în forma lui activă, X*. X e activat din punct de vedere chimic. Odată activat, X* se poate lega de promotorul genei Y, ducând la producerea lui Y. Dacă apare un al doilea semnal (diferit) care îl transformă pe Y în forma *lui* activă, Y*, celula are la dispoziție simultan X* și Y*. Acest aranjament poate servi ca poartă logică pentru funcția ȘI dacă există o a treia genă, Z, proiectată (de evoluție!) să fie activată numai dacă X* și Y* sunt prezente împreună și se leagă de promotorul său. Alte aranjamente pot implementa operatorul logic SAU, conform căruia Z e activat dacă X *sau* Y e transformat în forma sa activă și se leagă de promotorul lui Z. Când sunt legate laolaltă, secvențele unor astfel de procese chimice pot forma circuite care implementează cascade de semnale și de procesări ale informației la un nivel foarte complex. Pentru că factorii de transcriere sunt ei înșiși proteine produse de alte gene reglate la rândul lor de alți factori de transcriere, întreg angrenajul formează o rețea de control și procesare a informației cu funcții de feedback și feedforward analoge celor dintr-un circuit electric mare. Aceste circuite înlesnesc, controlează și reglează tiparele de informație din celulă.

Dat fiind numărul mare de combinații posibile ale componentelor moleculare și circuitelor chimice, poate vă imaginați că fluxul de informație dintr-o celulă e format din biți ce se agită frenetic și haotic. De fapt, lucrurile sunt mult mai ordonate. Există multe teme recurente sau tipare informaționale într-un număr mare de rețele, ceea ce sugerează o înaltă utilitate pentru anumite funcții biologice. Un exemplu e bucla de tip feedforward, al cărei concept de bază a fost prezentat în secțiunea anterioară referitoare la metabolismul bacteriei *E. coli*. Ținând cont că funcțiile logice pot fi porți pentru ȘI ori SAU (vezi caseta 6), există 13 combinații posibile de reglare a genelor, iar

Scanned with OKEN Scanner

dintre ele numai una, bucla de tip feedforward, e o rețea funcțională.[14] Întrucât e destul de simplu pentru o mutație dintr-o genă să elimine o legătură dintr-o rețea chimică, faptul că unele rețele funcționale supraviețuiesc atât de bine ne sugerează că, în evoluție, funcționează o puternică presiune bazată pe selecție. Trebuie să existe un motiv pentru care aceste tipuri recurente de rețele sunt vitale. O explicație poate fi robustețea. Experiența din domeniul ingineriei ne arată că atunci când mediul se modifică, o structură modulară cu o gamă mică de componente se adaptează mai repede. O altă explicație e versatilitatea. Având la dispoziție un instrumentar modest format din piese fiabile și testate de nenumărate ori, pot fi construite multe structuri folosind aceleași principii simple de proiectare în ordine ierarhică (așa cum pasionații de Lego și electronică știu foarte bine).[15]

Cu toate că m-am concentrat asupra factorilor de transcriere, există multe alte rețele complexe implicate în funcționarea celulelor, cum ar fi rețelele metabolice care controlează energia celulelor, rețelele de transducție a semnalelor care presupun interacțiuni proteină–proteină și, pentru animalele complexe, rețelele neuronale. Aceste rețele variate nu sunt independente, ci se cuplează între ele pentru a crea fluxuri de informație care se întrepătrund. Există și multe alte mecanisme prin care factorii de transcriere reglează procesele celulare, individual sau în grupuri, inclusiv acționând direct asupra ARN-ului mesager sau modificând alte proteine în diferite moduri. Existența unui număr atât de mare de căi chimice de reglare le permite să-și acordeze comportamentul în așa fel încât să cânte „muzica vieții" răspunzând la schimbările externe printr-un grad ridicat de fidelitate, la fel cum un radio bine reglat poate cânta fără cusur muzica lui Beethoven.

În organisme mai complexe, controlul genelor e la rândul său mai complex. Celulele eucariote, care au nucleu, își împachetează majoritatea ADN-ului în câțiva cromozomi (oamenii

Scanned with OKEN Scanner

au 23). În cromozomi, ADN-ul e așezat compact și înfășurat în jurul unor fusuri de proteină. În această formă compactă, materialul e cunoscut sub numele de cromatină. Felul în care cromatina e distribuită în nucleu depinde de mai mulți factori, printre care și etapa în care se află ciclul celular. O mare parte din ciclu, cromatina rămâne strâns legată, împiedicând „citirea" (transcrierea) genelor. Dacă e necesară o proteină codată de o genă sau de un grup de gene, arhitectura cromatinei trebuie să se schimbe pentru a permite mașinii de citire să aibă acces la segmentele corespunzătoare. Reorganizarea cromatinei e controlată de o rețea de fire sau microtubuli. Astfel, grupuri întregi de gene pot fi dezactivate sau activate *mecanic* fie ținându-le împachetate, fie desfăcând cromatina extrem de compactă în acea regiune a cromozomului unde trebuie să aibă loc transcrierea. Fenomenul ne amintește destul de mult de demonul lui Maxwell. În acest caz, demonii nucleari „trag sforile" în mod concret și deschid nu un obturator, ci un pachet ambalat în mod elaborat care cuprinde genele purtătoare de informații relevante. Nu întâmplător, celulele canceroase au o arhitectură cromatinică sensibil diferită, care sugerează un profil de expresie al celulei modificat. Voi reveni la acest subiect în următorul capitol.

Pe măsură ce oamenii de știință descoperă diagramele circuitelor celulare, apar multe posibilități practice ce permit rearanjarea configurației interne. Bioinginerii au început să proiecteze, să adapteze, să construiască și să reorienteze circuitevii astfel încât acestea să îndeplinească anumite sarcini biologice, de la producerea unor noi tratamente până la crearea unor procese biotehnice noi (chiar și rezolvarea anumitor probleme de aritmetică). Această „biologie sintetică" e limitată în mare parte la nivelul bacteriilor, dar, de curând, noile tehnologii au permis extinderea cercetării și la celulele mamiferelor. O tehnică numită „logică și aritmetică booleană prin excizie de ADN", a fost creată la Universitatea din Boston și ETH din

Scanned with OKEN Scanner

Zürich.[16] Cercetătorii pot construi circuite logice destul de complexe şi prevăd că vor putea să le folosească pentru a controla expresia genelor. Multe circuite pe care le-au construit par complet noi, adică nu au fost descoperite niciodată în organismele existente. Grupul lui Hideki Koboyashi de la Boston University este încrezător în posibilitatea reconfigurării fundamentale a organismelor cunoscute: „Cercetarea noastră reprezintă un pas înainte în dezvoltarea circuitelor genetice de tip *plug and play*, care pot fi folosite la crearea celulelor cu un comportament programabil".[17] La ora actuală, circuitele sintetice sunt un domeniu al biologiei sistemelor aflat în expansiune rapidă. În fiecare an sunt publicate tot mai multe articole care descriu în amănunt circuite noi.[18] Potenţialul medical al acestei noi abordări „electronice" asupra vieţii e uriaş. În cazul bolilor asociate cu gestionarea greşită a informaţiei (de exemplu, cancerul), unde există un modul ce funcţionează defectuos sau o legătură afectată din cadrul unui circuit, un posibil remediu poate fi reconfigurarea chimică a celulelor, nu distrugerea lor.*

CASETA 7: DUPĂ BIŢI ÎI VEŢI RECUNOAŞTE: APARIŢIA DOCTORULUI DIGITAL

Închipuiţi-vă un medic al viitorului (fără îndoială o inteligenţă artificială) care, având la dispoziţie o tehnologie uimitoare ce poate detecta în timp real expresia genică, ar privi tiparele agitate şi strălucitoare asemenea luminilor dintr-un oraş văzut de departe şi ar putea diagnostica pacientul. Ar fi vorba despre un medic digital care se ocupă cu biţi, nu cu ţesuturi, un fel de programator medical. Îmi închipui că doctorul meu din viitor îmi va putea spune că există semne de cancer în fază incipientă în cutare sau cutare aglomerare de celule sau că un defect genetic moştenit creează o zonă de anomalie luminoasă care indică supraexpresia cutărei sau cutărei pro-

* Aici apare o posibilitate îngrijorătoare, şi anume deturnarea acestor tehnici pentru a controla populaţia sau a comite genocid.

Scanned with OKEN Scanner

teine din ficat sau poate zone mai tăcute care sugerează că unele celule nu primesc destul oxigen, estrogen sau calciu. Studierea fluxului de informație și a aglomerării acesteia ar putea constitui un instrument de diagnostic mult mai puternic decât testele chimice folosite astăzi. Tratamentul s-ar concentra pe stabilirea unor tipare de informație sănătoase și echilibrate, poate prin repararea sau chiar reproiectarea unor module defecte, tot așa cum un inginer electronist (din vechime) ar înlocui un tranzistor sau un rezistor pentru a repara un aparat de radio. (Din acest punct de vedere, expunerea mea seamănă cu unele abordări orientale ale medicinei.) Poate că doctorul digital nu va încerca să înlocuiască module fizice, ci va decide să rescrie câteva linii de cod și să le încarce cumva în pacient la nivel celular pentru a restabilii funcțiile normale: un fel de *reinițializare* celulară.

Aceste lucruri pot părea de domeniul *științifico-fantastic*ului, însă biologia informației reflectă tehnologia informaticii, cu diferența că se află în urmă cu câteva decenii. „Codul" vieții a fost spart în anii '50 și '60 odată cu descifrarea ADN-ului și a descoperirii mecanismului de traducere. Acum trebuie să găsim limbajul informatic „de ordin superior" al vieții. Acesta e următorul pas esențial. Programatorii de azi nu ar proiecta un nou joc de computer scriind cantități uriașe de 1 și 0, ci ar folosi un limbaj de programare de ordin superior, precum Python. Prin analogie, când o celulă reglează potențialul electric din membrană prin creșterea numărului de protoni pe care îi pompează, descrierea de tip „cod mașină" în termeni de codoni ai genei nu e foarte lămuritoare. Celula ca unitate operează la un nivel cu mult superior pentru a-și gestiona starea fizică și cea informațională, folosind mecanisme de control complexe. Procesele de reglare nu sunt arbitrare, ci se supun propriilor reguli, la fel ca în cazul limbajelor informatice superioare folosite de programatori. Așa cum programatorii pot rescrie un cod avansat pentru a da instrucțiuni noi, tot așa și bioinginerii pot reprograma trăsăturile mai sofisticate ale sistemelor vii.

Scanned with OKEN Scanner

Rețelele genice ca module

Circuitele biologice pot genera o varietate foarte mare de forme și funcții, dar, din fericire pentru știință, funcționează pe baza unor principii simple. Mai sus, am vorbit despre Jocul vieții, în care câteva reguli simple executate în mod repetat pot genera un grad de complexitate surprinzător de ridicat. Să ne amintim că, în cadrul jocului, căsuțele sau pixelii au o stare activă sau inactivă (sunt plini sau goi), iar regulile de actualizare sunt date în funcție de starea celor mai apropiați vecini. Teoria rețelelor e foarte asemănătoare. O rețea electrică, de pildă, constă în mai multe comutatoare conectate între ele. Comutatoarele pot fi pornite sau oprite, iar o serie de reguli simple stabilesc ce se întâmplă cu un anumit comutator în funcție de semnalele care circulă de la comutatoarele învecinate. Întreaga rețea, care e ușor de modelat pe computer, poate fi pusă într-o anumită stare incipientă și apoi actualizată pas cu pas, exact ca un automat celular. Tiparele de activitate generate depind atât de schema legăturilor (topologia rețelei), cât și de starea incipientă. Teoria rețelelor poate fi dezvoltată la nivel general ca exercițiu matematic: comutatoarele se numesc „noduri", iar legăturile se numesc „muchii". Din reguli de rețea foarte simple poate decurge o activitate bogată și complexă.

Teoria rețelelor a fost aplicată în mai multe domenii: economie, sociologie, planificare și inginerie urbană, precum și în aproape orice subiect de cercetare, de la magnetismul materialelor la creier. Aș vrea să mă opresc puțin asupra teoriei rețelelor în cazul reglării expresiei genelor (când acestea sunt pornite sau oprite). La fel ca în situația automatelor celulare, rețelele pot prezenta diverse comportamente. Vreau să mă concentrez asupra celui în care sistemul devine ciclic. Cu ciclurile suntem obișnuiți din electronică. De exemplu, am în bucătărie o mașină de spălat vase performantă pe care am

Scanned with OKEN Scanner

montat-o chiar eu. Înăuntru, aparatul are o placă de circuite (care astăzi e, de fapt, un cip) care controlează ciclul. Există opt cicluri distincte. Maşina are un dispozitiv care opreşte ciclul dacă apare vreo problemă. Din acest punct de vedere, maşinile de spălat vase nu sunt unice: celulele din corpul nostru au un circuit similar care le controlează ciclurile.

Ce e ciclul celular? Imaginaţi-vă o bacterie nou-născută (cu alte cuvinte, situaţia în care bacteria-părinte s-a divizat). O celulă-fiică tocmai îşi începe existenţa independentă. Tânăra bacterie face ce fac bacteriile, adică în majoritatea cazurilor doar stă. Însă ceasul său biologic îşi spune cuvântul: aceasta simte nevoia să se reproducă. Au loc schimbări interne care culminează prin replicarea ADN-ului şi fisiunea întregii celule. Ciclul e complet.*

În organismele eucariote complexe, ciclul celular e, desigur, mai complicat. Un exemplu potrivit e drojdia, care, la fel ca oamenii, e eucariotă, dar e unicelulară. Ciclul celular al drojdiei a avut parte de multă atenţie (şi un Premiu Nobel, împărţit de Paul Nurse şi colegul meu de la ASU, Lee Hartwell), iar circuitul de control care operează ciclul a fost descoperit de Maria Davidich şi Stefan Bornholdt de la Universitatea din Bremen.[19] De fapt, există multe tipuri de drojdie. Voi discuta despre unul singur, *Schizosaccharomyces pombe*, cunoscută şi ca drojdia de fisiune. Reţeaua relevantă în acest caz apare în figura 11. Nodurile (punctele îngroşate din figură) reprezintă gene (sau, în sens strict, proteinele pe care le încifrează genele). Muchiile sunt căile chimice care unesc celulele (analoge cablurilor din electronică). Săgeţile arată că o genă o activează pe alta. Liniile punctate arată că o genă o inhibă sau o suprimă

* Povestea ceasului biologic e de-a dreptul fascinantă. După cum am precizat deja, la intensitate maximă, bacteriile pot parcurge întregul ciclu în 20 de minute, însă microbii rezistenţi care trăiesc la temperaturi sub zero grade (psicrofilii) parcurg un astfel de ciclu în sute de ani.

Scanned with OKEN Scanner

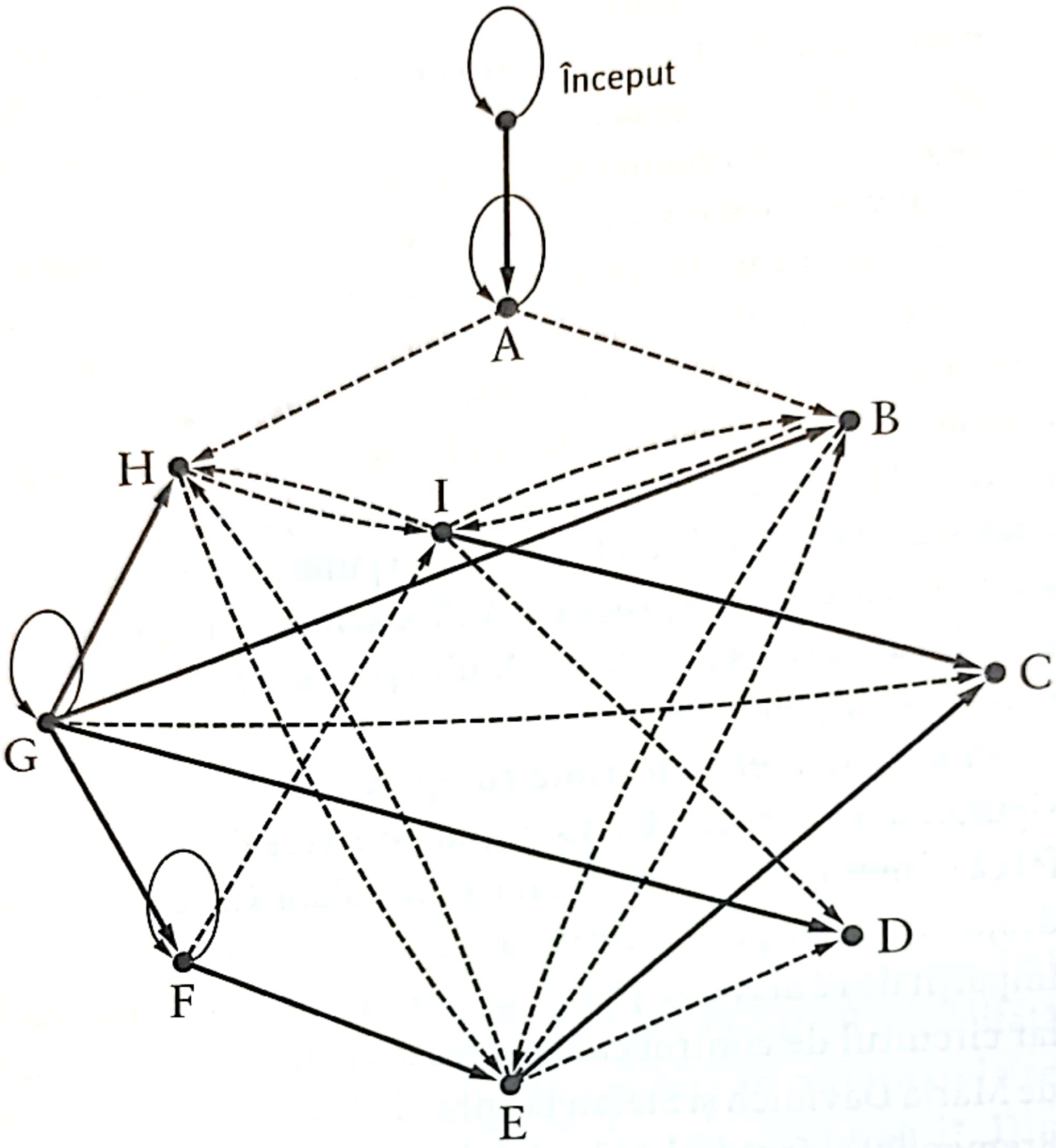


Figura 11 Rețeaua genică ce controlează ciclul celular al drojdiei. Nodurile reprezintă proteine care pot fi exprimate (I) sau nu (O) de către gena asociată. Linia continuă arată că expresia proteinei respective încurajează expresia celeilalte proteine reprezentate în nodul depărtat; linia întreruptă indică inhibarea.

pe alta (la fel cum pătratele învecinate din Jocul vieții determină dacă o anumită căsuță e plină sau goală). Observăm că există gene cu săgeți sub formă de buclă, care indică autoinhibarea. Fiecare genă adună toate plusurile („activare!“) și minusurile („inhibare!“) săgeților îndreptate spre ea și se activează, se dezactivează sau rămâne așa cum e conform unei reguli de vot specifice.

Scanned with OKEN Scanner

TABELUL 2

Etapă în timp	Început	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Fază celulară
1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	Început
2	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	G1
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	G1/S
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	G2
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	G2
6	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	G2/M
7	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	G2/M
8	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	M
9	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	M
10	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	G1

Acest tabel arată fiecare stare a rețelei genice care controlează ciclul celular al drojdiei, prezentat în figura 11. Literele corespund etichetelor date nodurilor din figură; 0 arată că nodul relevant e oprit, iar 1, că e pornit.

Sarcina acestei rețele e să treacă celula prin toți pașii ciclului, oprind procesul dacă apar nereguli și readucându-l la starea inițială când ciclul se termină. La nivelul său fundamental de funcționare, rețeaua poate fi tratată pur și simplu ca o grupare de comutatoare interconectate ce poate fi modelată de un computer. Rețeaua de reglare a genelor care controlează ciclul celular al drojdiei de fisiune e deosebit de ușor de studiat pentru că, aproximând cu o precizie destul de mare, genele implicate pot fi considerate complet activate sau oprite, fără a oscila între cele două stări. Acest lucru permite o simplificare plăcută pentru că, matematic vorbind, putem reprezenta „activările" prin 1 și „opririle" prin 0, apoi putem face un tabel cu 0 și 1 pentru a descrie ce se întâmplă când rețeaua pornește

Scanned with OKEN Scanner

dintr-o anumită stare și e lăsată să treacă prin tot repertoriul său redus.*

Conform felului în care am notat genele din figura 11, starea incipientă a rețelei este A: oprit; B: pornit; C: oprit; D: pornit; E: oprit; F: oprit; G: oprit; H: pornit; I: oprit. În cod binar, asta înseamnă 010100010. Ciclul începe când nodul numit „început", care pornește spectacolul, se activează (adică primește o comandă chimică externă de genul: „Hai, ce mai stai, apucă-te de treabă!"). Apoi e simplu să rulezi un model al rețelei pas cu pas și să compari rezultatul cu realitatea. Tabelul 2 arată starea rețelei la fiecare pas. Stările intermediare de 0 și 1 corespund unor stări fizice recognoscibile prin care celula trece în fiecare ciclu. Denumirile lor apar în coloana din dreapta. Literele reprezintă termeni biologici (de exemplu M vine de la mitoză). După zece pași, rețeaua revine la starea inițială, așteptând un nou semnal de pornire ca să înceapă următorul ciclu.

Pe baza figurii 11 se poate face un film în care nodurile se aprind când sunt pornite și se sting când sunt oprite. Întreaga schemă ar arăta ca un tipar de luminițe care licăresc ca niște licurici desincronizați. Mișcarea ar putea fi pusă pe muzică – muzica vieții! Să transpunem la scară mai mare această imagine și să ne închipuim o ființă umană ca pe o constelație amețitoare de gene aprinse care licăresc și formează mii de tipare intermitente: o adevărată cacofonie dacă traducem totul în note muzicale. Câmpul de lumini n-ar fi format numai din genele care controlează ciclurile diferitelor tipuri de celulă. Ar exista 20.000 de gene, fiecare cu propriul ei spectacol. Unele lumini ar sta mai mult stinse, altele mai mult aprinse, în timp ce altele ar porni și s-ar opri în ritmuri diferite.

---

* Astfel de rețele simple se numesc „rețele boolene", de la George Boole, care, în secolul al XIX-lea, a introdus ideea unei algebre de operații logice.

Scanned with OKEN Scanner

Ce vreau să spun e că aceste tipare nestatornice de informație nu sunt aleatorii: ele reflectă activitatea organizată a rețelei și, prin urmare, a organismului. Întrebarea este ce putem învăța dacă le studiem, dacă folosim modele matematice și informatice pentru a caracteriza tiparele dinamice, pentru a urmări fluxul de informație, pentru a vedea dacă e stocată și cât timp, pentru a identifica „genele de gestiune" și trântorii. Pe scurt, urmărim să construim o descriere bazată pe informație care surprinde esența a ceea ce este organismul, inclusiv structura gestionării interne, arhitectura de control și potențialele sale puncte defectuoase.

Putem începe cu drojdia: nu există decât zece noduri și douăzeci și șapte de muchii în rețeaua ciclului celular al *Schizosaccharomyces pombe*. Însă chiar și pentru analiza acestui ansamblu e nevoie de multă putere de calcul. În primul rând, trebuie să confirmăm că tiparele sunt nonaleatorii. Mai exact, dacă ar fi să construim la întâmplare o rețea cu același număr de noduri și muchii, oare tiparele generate s-ar deosebi în vreun fel de cele produse de rețeaua drojdiei create de Mama Natură? Ca să găsească răspuns la această întrebare, colegii mei de la ASU, Hyunju Kim și Sara Walker, au efectuat un studiu computerizat în care au urmărit fluxul și refluxul informației în timp ce se desfășura prin rețeaua drojdiei.[20] Pare simplu, dar nu e. Nu este ceva ce se poate urmări cu ochiul liber: trebuie să existe o definiție matematică precisă a transferului de informație (vezi caseta 8). Potrivit rezultatului obținut de cei doi cercetători, în rețeaua drojdiei există un flux de informație ridicat și sistematic, mult prea accentuat pentru a fi considerat aleatoriu. Se pare că evoluția a sculptat arhitectura rețelei respective în vederea procesării informației.

Scanned with OKEN Scanner

CASETA 8: MONITORIZAREA FLUXULUI DE INFORMAȚIE DIN REȚELELE GENICE

Ne-am putea întreba cu privire la nodul A al unei rețele dacă ne ajută să-i cunoaștem istoricul pentru a putea anticipa ce va face în următoarea etapă. Cu alte cuvinte, dacă ne uităm la trei pași anteriori ai nodului A și observăm că era „pornit" sau „oprit", oare acest istoric în trei pași ne îmbunătățește șansele de a ghici corect dacă în etapa următoare A va fi pornit sau oprit? Dacă da, atunci putem spune că o anumită informație a fost înmagazinată în nodul A. Apoi ne uităm la un alt nod, să spunem B, și ne întrebăm dacă starea actuală a lui B ne *crește* șansele de a anticipa corect ce urmează să facă A, pe lângă cunoașterea pe care o avem despre trecutul lui A. Dacă răspunsul e afirmativ, atunci o parte din informație a fost transferată de la B la A. Folosindu-se de această definiție, cunoscută sub numele de „entropie de transfer", colegii mei au stabilit o ierarhie a perechilor de noduri din rețeaua ciclului celular al drojdiei în funcție de cantitatea de informație transferată și au comparat această ierarhie cu cele obținute pornind de la o medie bazată pe o mie de rețele aleatorii. Diferențele au fost foarte mari. Foarte pe scurt, rețeaua genică a drojdiei transferă mult mai multă informație decât o rețea aleatorie. Sondând mai adânc pentru a afla ce anume determină această diferență, cei doi cercetători au localizat un grup de patru noduri (B, C, D și H din figura 11) care păreau să decidă lucrurile. Rolul special al acestor patru gene le-a câștigat denumirea de „nucleu de control". Nucleul de control acționează ca un coregraf pentru restul rețelei. Astfel, dacă vreunul dintre celelalte noduri face o greșeală (e pornit când ar trebui să fie oprit, și viceversa) nucleul de control îl readuce pe făgașul corect. Practic, ghidează întreaga rețea către destinația stabilită și, din punct de vedere biologic, asigură fisiunea celulei în perfectă sincronizare cu tot restul. Nucleele de control par să fie o trăsătură generală a rețelelor biologice. Prin urmare, în ciuda comportamentului extrem de complex, dinamica unei rețele poate fi deseori înțeleasă urmărind un subansamblu relativ mic de noduri.

Ar fi o greșeală din partea mea să creez impresia că fluxul de informație în biologie e limitat la rețelele regulatoare genice. Din nefericire, complexitatea suplimentară a altor rețele le

Scanned with OKEN Scanner

face și mai greu de modelat computațional, mai ales că versiunea binară (oprit și pornit) nu va fi suficientă în general. În plus de asta, numărul componentelor crește exponențial când vine vorba de funcții mai fine, precum metabolismul. Ideea generală rămâne valabilă: biologia va „ieși în evidență" din complexitatea aleatorie prin felul în care e procesată și ordonată informația și, cu toate că e complex, software-ul vieții va fi în continuare mult mai simplu decât sistemele moleculare subiacente care îl sprijină, la fel ca în cazul circuitelor electrice.

Teoria rețelelor confirmă perspectiva conform căreia informația poate căpăta „viață proprie". În cazul rețelei drojdiei, colegii mei au descoperit că 40% din perechile de noduri care sunt corelate prin transferul de informație nu sunt, de fapt, legate fizic; nu există nici o interacțiune chimică directă. Pe de altă parte, aproximativ 35% din perechile de noduri nu transferă vreun fel de informație între ele chiar dacă *sunt* legate printr-un „fir chimic" (muchie). Tiparele de informație care traversează sistemul pot lăsa impresia că merg de-a lungul „firelor" (de-a lungul muchiilor rețelei) chiar și atunci când nu se deplasează. Dintr-un motiv sau altul, „corelația fără cauzalitate" pare să fie amplificată în biologie prin comparație cu rețelele aleatorii.

În volumul *Vă țineți de glume, domnule Feynman!*,[21] marele fizician și povestitor relatează cum, în tinerețe, începuse să i se ducă vestea că e în stare să repare radiouri defecte (da, iarăși acest aparat!). La un moment dat, a fost certat pentru că a aruncat o privire rapidă în radio și apoi a început doar să meargă înainte și înapoi. Fiind Richard „Supercreierul" Feynman, și-a dat seama rapid care era problema și a făcut o reparație simplă. „Repară radiouri cu puterea minții!" a exclamat clientul lui uimit. Adevărul e că, în general, nu poți să-ți dai seama care e problema unui circuit electric doar uitându-te rapid la cum e dispus. Funcționarea unui radio depinde atât de topologia circuitului, cât *și* de caracteristicile fizice ale componentelor.

Scanned with OKEN Scanner

Dacă un rezistor, de pildă, e prea mare sau un condensator e prea mic, fluxul de informație poate să nu fie optim, iar semnalul poate fi distorsionat. Același lucru e valabil pentru toate rețelele: biologice, ecologice, sociale sau tehnologice. Rețele asemănătoare ca aspect pot prezenta tipare ale fluxului de informație foarte diferite pentru că nodurile (componentele lor) pot avea proprietăți diferite. În cazul ciclului celular al drojdiei, s-a folosit o regulă simplă de tip pornit-oprit (obținându-se rezultate impresionante), dar există multe relații matematice diferite care pot fi utilizate, fiecare dintre ele putând să genereze alte tipare de flux. În concluzie, nu există o relație evidentă între dinamica tiparului de informație și topologia „circuitului". Prin urmare, din multe motive practice, merită să tratăm tiparele de informație drept o „chestiune de interes" și să uităm de rețelele subiacente care le sprijină. Numai în cazul în care ceva nu merge bine suntem obligați să ne preocupăm de sistemele fundamentale propriu-zise.

Doi matematicieni israelieni, Uzi Harush și Baruch Barzel, au efectuat de curând un studiu sistematic folosind un model computerizat al fluxului de informație într-o gamă largă de rețele. Aceștia au monitorizat în amănunt contribuția fiecărui nod și traseu la fluxul de informație în încercarea de a identifica căile principale de circulație a informației. Pentru a realiza acest lucru, au încercat să se joace cu sistemul, de exemplu, au „înghețat" noduri ca să vadă cum se schimbă fluxul de informație și apoi au evaluat influența exercitată de această modificare asupra puterii unui semnal dintr-un anumit nod aflat pe restul traseului. Au avut parte de unele surprize: în unele rețele, informația curgea mai ales prin joncțiuni (o joncțiune sau un hub e locul în care se concentrează mai multe legături, precum serverele de internet), în vreme ce în altele informația evita joncțiunile cu totul, preferând să rămână la periferia rețelei. În ciuda diversității rezultatelor, matematicienii au descoperit că „tiparele fluxului de informație sunt

Scanned with OKEN Scanner

guvernate de legi universale ce pot fi conectate direct la dinamica microscopică a sistemului".[22] Legi universale? Această afirmație atinge esența întrebării legate de momentul în care e legitim să considerăm tiparele de informație lucruri coerente cu existență independentă. În opinia mea, dacă se supun anumitor reguli sau legi, tiparele pot fi tratate ca entități de sine stătătoare.

Inteligența colectivă

Du-te, leneșule, la furnică și vezi munca ei și prinde minte! —Pildele lui Solomon, 6:6

Teoria rețelelor și-a găsit o aplicabilitate fructuoasă în domeniul insectelor sociale, care prezintă la rândul lor un comportament organizat complex derivat din aplicarea repetată a unor reguli simple stabilite între indivizii învecinați. Stăteam odată pe o plajă din Malaysia sub o umbrelă de paie fixată pe un par de lemn. Îmi amintesc că beam bere și mâncam chipsuri de cartofi. Unul dintre chipsuri a căzut pe jos, unde l-am și lăsat. Puțin mai târziu am observat cum un grup de furnici dă târcoale obiectului abandonat, cuprinse de un interes vizibil. La scurt timp după aceea, au început să-l transporte, mai întâi orizontal pe nisip, apoi vertical pe parul de lemn. Era un efort colectiv eroic: chipsul era mare, în vreme ce ele erau mici. (De altfel, nici prin cap nu-mi trecea că furnicilor le plac chipsurile.) Dar s-au ridicat la înălțimea provocării. Organizate pe margine, fetele (furnicile muncitoare sunt toate femele) de sus trăgeau, iar cele de jos împingeau. Încotro se îndreptau? Am observat o fantă verticală în vârful parului, unde stăteau de strajă câteva furnici. Acela trebuie să fie cuibul lor. Dar tot efortul de până acum era, fără îndoială, zadarnic, pentru că (a) chipsul părea prea mare pentru fanta respectivă și (b) furnicile ar fi fost nevoite să-l rotească (chipsul era aproximativ

Scanned with OKEN Scanner

plat) de două ori la unghiuri de 90° ca să-l introducă în cuib. Înainte ca manevra să poată fi efectuată, trebuia să ajungă perpendicular în plan vertical pe suportul de lemn. Câteva minute mai târziu, am observat cu uimire că strategia furnicilor funcționase: chipsul era tras prin fantă fără să se rupă. Cumva, minusculele creaturi cu creier cât vârful unui ac evaluaseră dimensiunile și forma chipsului când stătea pe nisip și își dăduseră seama cum să-l rotească astfel încât să se potrivească prin fantă. Și au reușit să execute manevra din prima încercare!

Există o mulțime de astfel de povești. Entomologilor le place să organizeze provocări și obstacole pentru furnici, încercând să le păcălească cu diferite trucuri minore. Preocupările lor principale par să fie mâncarea și un loc bun în care să trăiască (preocuparea furnicilor, deși, fără îndoială, și a entomologilor), motiv pentru care petrec mult timp căutând hrană, umblând în diferite locuri aparent aleatoriu și căutând zone mai bune în care să-și construiască un cuib. La ASU există un grup de cercetare a insectelor sociale condus de Stephen Pratt, iar o vizită în laboratorul de furnici e întotdeauna o experiență distractivă. Cum aproape toate furnicile aceleiași specii arată la fel, cercetătorii le marchează cu puncte colorate ca să le poată monitoriza pe fiecare în parte și să vadă ce pun la cale. Furnicile nu par să fie deranjate. Cu toate că, la prima vedere, agitatele insecte par să se deplaseze aleatoriu, în cea mai mare a timpului fac exact opusul. Acestea identifică trasee în funcție de cea mai scurtă distanță față de cuib și le marchează chimic. Dacă, în cadrul experimentului, strategia lor e întreruptă de un entomolog (de exemplu, prin mutarea sursei de hrană), furnicile recurg automat la Planul B, reevaluând topografia locală. Cea mai distinctivă trăsătură a comportamentului lor e comunicarea reciprocă. Când o furnică o întâlnește pe alta, are loc un mic ritual prin care informațiile poziționale sunt

Scanned with OKEN Scanner

transmise celeilalte furnici.* Astfel, datele strânse de o singură furnică pot fi diseminate într-o mare parte din colonie. Calea e deschisă acum pentru luarea unei decizii colective.

În cazul chipsului furat, era limpede că nici o furnică nu planificase strategia dinainte. Nu exista vreun șef (de fapt, vreo șefă) de șantier. Deciziile erau luate colectiv. Dar cum? Dacă, în drum spre casă de la birou, mă întâlnesc cu un prieten și el mă întreabă „Ce mai faci, amice?", riscă să fie supus la cinci minute de sporovăială în general neinteresantă (care, cu toate astea, poate oferi multă informație). Dacă nu cumva furnicile vorbesc foarte repede, întâlnirile lor vremelnice nu pot însemna mai mult de câteva enunțuri logice de genul „dacă X, atunci Y". Însă dacă integrăm discuțiile de la furnică la furnică din cadrul unei colonii, puterea de procesare colectivă a informației crește simțitor.

Nu doar furnicile dau dovadă de o formă de luare a deciziilor la nivel de roi, ba chiar, ar spune unii, de inteligență a roiului. Stolurile de păsări și bancurile de pești se comportă și ele la unison, intrând în picaj și cotind deodată, ca și cum toți indivizii ar avea una și aceeași minte. Cea mai bună explicație pe care o putem da la ora actuală acestui tip de comportament e aceea că aplicarea unor reguli simple repetată de multe ori poate însuma ceva destul de sofisticat. Colegii mei de la ASU studiază conceptul de „calcul distribuit", aplicând teoria informației asupra speciei *Temnothorax rugatulus*, care formează colonii cu un număr relativ mic de furnici muncitoare (mai puțin de 300), ceea ce le face mai ușor de urmărit. Obiectivul lor e să monitorizeze cum se deplasează informația în colonie, cum e înmagazinată și cum se propagă în timpul procesului de construire a cuibului. Toate acestea se fac în laborator, în condiții controlate. Furnicilor li se oferă mai multe cuiburi

* O altă strategie de comunicare a furnicilor e stigmergia: comunicarea cu ajutorul mediului, depozitând și simțind feromoni.

Scanned with OKEN Scanner

noi (cuibul vechi este răscolit suficient de mult pentru a le face să-și caute o altă casă), iar cercetătorii studiază cum e luată decizia la nivel colectiv. Când furnicile se mută în masă, câteva dintre cele care cunosc drumul se întorc la cuib și le conduc pe celelalte: fenomenul se numește „alergare în tandem". Lucrurile se petrec destul de lent, pentru că furnicile înaintează stângace, atingându-și mereu liderii ca să se asigure că nu se rătăcesc (furnicile nu văd prea departe). Când destule furnici au învățat terenul, alergarea în tandem e înlocuită de „ducerea în cârcă", care e mai rapidă.

Un lucru asupra căruia s-au concentrat colegii mei e alergarea în tandem în sens invers, când o furnică știutoare conduce o altă furnică de la cuibul nou înapoi la cel vechi. De ce ar face asta? Pare să aibă de-a face cu dinamica feedbackului negativ și a ștergerii informației, dar deocamdată nu există un răspuns concludent. Ca să ajute procesul, cercetătorii au creat o furnică de plastic care are înăuntru un magnet. E condusă de un mic robot ascuns sub scândura pe care merg furnicile. Înarmați cu furnici artificiale cu telecomandă, colegii mei pot crea propriile alergări în tandem pentru a testa diverse teorii. Întregul experiment e înregistrat în vederea unei analize cantitative viitoare. (Vă puteți da seama că această direcție de cercetare e foarte distractivă!)

Insectele sociale reprezintă o etapă intermediară fascinantă în organizarea vieții, iar modul în care procesează informația e deosebit de interesant. Însă rețeaua vastă și complexă a vieții de pe Pământ e țesută din schimbul de informații între indivizi și grupuri la toate nivelurile, de la bacterii până la societatea umană. Chiar și virușii pot fi considerați pachete de informație mobile care roiesc pe toată planeta. Dacă privim întregi ecosisteme drept rețele de transport și stocare a informației, ne vom confrunta cu mai multe întrebări importante. De exemplu, caracteristicile fluxului de informații respectă

Scanned with OKEN Scanner

oare vreo lege scalară* pe măsură ce urcăm în ierarhia complexității de la rețelele de reglare genică până la ecosistemele din adâncurile oceanului și la pădurile tropicale? Foarte probabil, toată viața de pe Pământ ar putea fi caracterizată prin anumite semnături informaționale specifice. Dacă viața terestră nu are nimic special, atunci ne putem aștepta ca viața apărută în alte lumi să respecte aceleași legi scalare și să prezinte aceleași proprietăți, lucru care e de un mare ajutor în căutarea unor biosemnături clare pe planete din afara sistemului solar.

Misterul morfogenezei

Dintre toate capacitățile uluitoare ale vieții, morfogeneza (dezvoltarea formei) e una dintre cele mai frapante. Cumva, informația sădită într-o structură unidimensională de ADN și comprimată într-un volum de un miliard de ori mai mic decât al unui bob de mazăre dezlănțuie o coreografie de o precizie și complexitate superbe manifestate într-un spațiu tridimensional, ajungându-se chiar și până la dimensiunile unui bebeluș complet format. Cum se poate așa ceva?

În capitolul 1, am spus cum în secolul al XIX-lea embriologul Hans Dreisch era convins că în dezvoltarea embrionului e implicată un fel de forță vitală. Acest vitalism destul de vag a fost înlocuit de ideea mai precisă a „câmpului morfogenetic". Până la sfârșitul secolului al XIX-lea, fizicienii se bucurau de mare succes folosind conceptul de câmp, inițial datorită lui Michael Faraday. Cel mai familiar exemplu este electricitatea: o sarcină localizată într-un punct din spațiu creează un câmp electric ce se extinde în regiunea tridimensională din jurul

* O lege scalară e o relație matematică folosită pentru a descrie felul în care o cantitate crește sau scade în funcție de o scară. De exemplu, în sistemul solar există un număr mult mai mare de obiecte mici, precum asteroizii și sateliții naturali, comparativ cu numărul de planete.

Scanned with OKEN Scanner

său. Câmpurile magnetice sunt și ele ceva comun. Prin urmare, nu e surprinzător că biologii au căutat să modeleze morfogeneza în același spirit. Problema era că nimeni nu putea răspunde convingător la întrebarea evidentă: *Ce* fel de câmp? Nu era în mod clar electric sau magnetic; cu siguranță nu era gravitațional sau nuclear. Așadar, trebuie să fie un fel de „câmp chimic" (adică un fel de substanțe chimice răspândite prin organism în diferite concentrații), însă identitatea „morfogenilor" chimici a rămas mult timp un mister.

Aveau să treacă mai multe decenii până să se înregistreze progrese semnificative. În a doua jumătate a secolului XX, biologii au început să abordeze morfogeneza din punct de vedere genetic. Povestea pe care au conceput-o sună cam așa: când un embrion se dezvoltă dintr-un ou fertilizat, celula unică inițială (zigotul) începe cu aproape toate genele „pornite". Pe măsură ce se divide, diverse gene sunt dezactivate: diferite gene din diferite celule. Ca urmare, un ghem de gene inițial identice începe să se diferențieze în tipuri distincte de celule, parțial sub influența morfogenilor care pot controla în mod evident activarea genică. Până când embrionul e complet format, procesul de diferențiere a creat toate tipurile distincte de celule necesare.*

Toate celulele din corpul nostru au *același* ADN, însă o celulă epitelială e diferită de o celulă din ficat și e diferită de o celulă din creier. Informația din ADN e numită *genotip*, iar celula fizică în sine se numește *fenotip*. Prin urmare, un genotip poate genera multe fenotipuri diferite. Bun. Dar cum se strâng celulele hepatice în ficat, celulele cerebrale, în creier și așa mai departe (echivalentul celular al expresiei „cine se aseamănă se adună")? Majoritatea lucrurilor pe care le știm acum le-am aflat din studierea musculiței de oțet *Drosophila*. Unii

* Unele celule, celulele stem pluripotente, rămân doar parțial diferențiate și au potențialul să devină alte tipuri de celule.

Scanned with OKEN Scanner

morfogeni provoacă celulele nediferențiate să se diferențieze în diferitele tipuri de țesut (ochi, intestine, sistem nervos etc.) situate în anumite regiuni. Acest lucru creează o buclă de feedback între diferențierea celulelor și eliberarea altor morfogeni în regiuni diferite. Anumite substanțe numite factori de creștere (am pomenit mai sus despre unul dintre ei, FCE) accelerează reproducerea celulelor din zona respectivă, ceea ce va modifica geometria locală prin creștere diferențiată. Această descriere superficială e ușor de enunțat, dar nu la fel de ușor de transformat într-o explicație științifică detaliată, în mare măsură pentru că depinde de cuplarea dintre rețele chimice și rețele de gestionare a informației, astfel încât avem de-a face cu două rețele cauzale interconectate și dinamice. Pe lângă toate astea, au început să apară dovezi tot mai concludente că morfogeneza depinde nu doar de gradienții chimici, ci și de forțe fizice (electrice și mecanice). Voi discuta acest subiect remarcabil în următorul capitol.

Interesant este că Alan Turing a fost interesat de problema morfogenezei și a studiat câteva ecuații care descriu cum ar putea substanțele chimice să străbată un țesut pentru a forma un gradient de concentrație, reacționând în moduri ce pot produce tipare tridimensionale. Deși Turing era pe calea cea bună, lucrurile au avansat cu greu. Chiar și în privința morfogenilor identificați până acum există încă nelămuriri. Pentru a putea confirma că o substanță chimică are rol de morfogen trebuie să clonăm celulele care o generează și să le implantăm într-o altă regiune (astfel de celule sunt numite „ectopice") ca să vedem dacă produc o trăsătură duplicat acolo unde n-ar trebui. Deseori, așa se întâmplă. Au fost create muște cu mai multe aripi și vertebrate cu mai multe degete. Dar chiar și identificarea tuturor substanțelor care afectează în mod direct celulele scufundate în ele e numai o mică parte din poveste. Multe dintre substanțele chimice care străbat țesutul embrionar nu afectează în mod direct celulele, ci joacă rolul de agenți

Scanned with OKEN Scanner

de semnalizare pentru a regla alte substanțe chimice. Lămurirea detaliilor reprezintă o provocare uriașă.

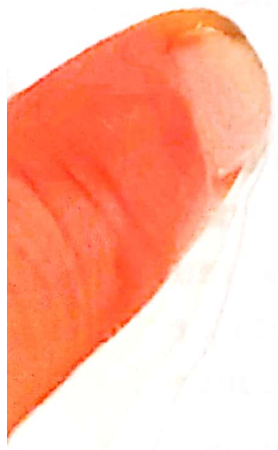
Un factor care complică și mai mult lucrurile e acela că genele individuale acționează rareori de unele singure. Am explicat deja că ele formează rețele în care proteinele exprimate de o genă pot inhiba sau stimula expresia altor gene. Regretatul Eric Davidson și colaboratorii săi de la California Institute of Technology au reușit să identifice diagrama circuitului (chimic) al rețelei alcătuite din aproximativ 50 de gene care reglează etapele incipiente din dezvoltarea ariciului de mare (acest animăluț modest i-a atras atenția lui Dreisch în urmă cu un secol). Grupul de la Caltech a programat apoi un computer, a introdus condițiile corespunzătoare începutului dezvoltării și a pornit o simulare pas cu pas a dinamicii rețelei, stabilind pauze de jumătate de oră între pași. La fiecare etapă, comparau modelul computerizat cu stadiul de dezvoltare al ariciului de mare pe care îl observau. Astfel, s-a observat că simularea se potrivește perfect cu etapele reale din dezvoltarea organismului (lucru confirmat prin măsurarea profilului de expresie a genei). Însă echipa lui Davidson a mers mai departe de atât. Au vrut să verifice dacă, umblând la circuit, embrionul avea să pățească ceva. De exemplu, au efectuat experimente în care au eliminat una dintre genele din rețea (*delta*), ceea ce a dus la pierderea întregului țesut mezoderm nonscheletic (o anormalitate flagrantă). Când au modificat și modelul computerizat al rețelei, rezultatele s-au potrivit perfect cu observațiile experimentale. Într-un experiment și mai drastic, au injectat în ou o catenă de ARN mesager care inhibă producția enzimei critice numită Pmar1. Efectul a fost dramatic: întregul embrion s-a transformat într-un ghem de celule scheletogene. Din nou, modelul computerizat bazat pe diagrama circuitului a descris aceeași transformare majoră.

Diferitele exemple pe care le-am dat ilustrează puterea și magnitudinea „gândirii electronice“ în monitorizarea fluxului

Scanned with OKEN Scanner

de informații prin organisme și conectarea lui la trăsături structurale importante. Unul dintre cele mai puternice aspecte ale conceptului de informație în biologie e acela că aceleași idei se aplică deseori la toate scările de mărime. În eseul său vizionar, Nurse scrie că „principiile și regulile care stabilesc felul în care e gestionată informația pot avea multe în comun la aceste niveluri diferite, chiar dacă elementele lor sunt complet distincte. [...] Prin urmare, e foarte posibil ca multe dintre cercetările efectuate în cadrul unor sisteme de nivel superior să le informeze pe cele situate la un nivel mai simplu al celulei și invers".[23]

Până acum, am avut în vedere tiparele și fluxul informației la nivel molecular din ADN, la nivelul celulei din ciclul celular al drojdiei, la nivelul dezvoltării formei în organismele pluricelulare și la nivelul comunităților de organisme. Dar când Schrödinger vorbea despre „cristalul aperiodic", el se referea la informația ce poate fi *transmisă* de la o generație la alta. Desigur, informația se propagă în tipare complexe în cadrul organismelor și ecosistemelor, dar aceasta curge și vertical, vărsându-se ca o cascadă de-a lungul generațiilor și asigurând fundamentele pentru selecția naturală și schimbarea evolutivă. De fapt, aici, la intersecția dintre darwinism și teoria informației, e locul în care misterioasa cutie magică a vieții își pregătește cele mai mari surprize.



Scanned with OKEN Scanner

4. DARWINISM 2.0

Nimic din biologie nu are sens decât în lumina evoluției.
—Theodosius Dobzhansky[1]

„Natura, cu colți și gheare-nsângerate." Alfred Tennyson a așternut pe hârtie aceste cuvinte grăitoare în zorii epocii darwiniene. E de înțeles că oamenii de știință și poeții acelor vremuri erau dornici să zăbovească asupra brutalității selecției naturale manifestate prin cursa înarmării reprezentată de adaptările fizice ale ființelor vii, de la dinții ascuțiți ca niște pumnale ai rechinului la carapacea dură și protectoare a țestoasei. E ușor de înțeles cum evoluția ar putea favoriza aripi mai mari, picioare mai lungi sau vedere mai ascuțită pe parcursul luptei neînduplecate pentru supraviețuire. Însă corpurile (hardware-ul vieții) reprezintă doar jumătate din poveste. La fel de importante (ba chiar mai importante) sunt tiparele dinamice de informație, sistemele de control care reprezintă software-ul vieții. Evoluția operează pe bază de software și de hardware biologic. Nu ne dăm seama imediat de acest lucru, pentru că informația este invizibilă. Nu observăm nici demonii minusculi care coordonează și procesează toată această informație, însă perfecțiunea lor aproape termodinamică e rezultatul a miliarde de ani de rafinare a procesului de evoluție.[2]

Aici există o analogie cu industria computerelor. În urmă cu 30 de ani, computerele personale erau greoaie și voluminoase. Inovații precum mouse-ul, ecranele color și bateriile compacte au făcut computerele mult mai eficiente și convenabile, prin urmare vânzările au explodat. Astfel, versiunea

Scanned with OKEN Scanner

capitalistă a selecției naturale a condus la o creștere masivă a populației computerelor. Însă, pe lângă inovațiile din domeniul hardware-ului, s-au înregistrat progrese și mai impresionante la nivelul software-ului. Primele versiuni de Photoshop sau PowerPoint, de exemplu, sunt o umbră palidă a celor existente acum pe piață. Cel mai important, viteza computerelor a crescut enorm, în timp ce costul a scăzut dramatic; iar îmbunătățirile programelor au contribuit la succesul produsului cel puțin la fel de mult precum componentele electrice.

Perspectiva informațională asupra vieții a pătruns în povestea evoluționistă abia la un secol de la publicarea teoriei lui Darwin. Domeniul bioinformaticii e acum o industrie vastă și extinsă care acumulează cantități uluitoare de date și se bucură de multă atenție. Publicarea în 2003 a primei secvențe complete a genomului uman (rezultat al unui efort internațional titanic) a fost considerată un punct de cotitură pentru biologie în general, și științe medicale în mod special. Cu toate că importanța acestei realizări de referință nu trebuie minimalizată, foarte curând a devenit clar că cunoașterea detaliilor unui genom nu „explică viața".

Când teoria darwiniană a evoluției a fost combinată cu genetica și biologia moleculară la mijlocul secolului XX în așa-numită „sinteză modernă", povestea părea înșelător de simplă. ADN-ul e un obiect fizic; copierea lui va presupune în mod obligatoriu erori aleatorii, oferind un mecanism pentru variația genetică pe baza căruia poate acționa selecția naturală. Dacă facem o listă a genelor și a funcțiilor proteinelor codate, restul componentelor vor fi simple detalii.

În urmă cu aproape 20 de ani, această perspectivă simplistă asupra evoluției a început să se fisureze. Drumul de la un inventar de proteine la o anatomie tridimensională funcțională e lung, iar „lista pieselor" proteice pe care ni le oferă genomul e inutilă fără „instrucțiunile de asamblare". Chiar și astăzi, fără o cunoaștere prealabilă, nimeni nu poate prezice doar

Scanned with OKEN Scanner

pornind de la o secvență genomică felul în care va arăta un organism real, cu atât mai puțin felul în care schimbările aleatorii din secvența genomului s-ar traduce în schimbări la nivelul fenotipului.

Genele influențează lucrurile numai când sunt exprimate (adică activate) și abia aici, în domeniul controlării și gestionării genelor, începe adevărata poveste a bioinformaticii. Acest câmp de studiu emergent se numește epigenetică și e mult mai bogat și mai subtil decât genetica în sine. Sunt descoperiți tot mai mulți factori epigenetici care dirijează organizarea tiparelor și fluxurilor de informație biologică. Rafinarea și extinderea actuală a darwinismului (fenomen pe care îl numesc darwinism 2.0) ne oferă o perspectivă complet nouă asupra puterii informației în biologie, deschizând calea unei importante revizuiri a teoriei evoluției.

Monștri electrici

Ereditatea înseamnă mai mult decât gene.
—Eva Jablonka[3]

„A venit din spațiu! Viermele plat cu două capete i-a uluit pe oamenii de știință",[4] titra o publicație britanică online în iunie 2017. Subiectul articolului era apariția unor monștri pe Stația Spațială Internațională. Monștrii n-au invadat stația, ci au apărut ca urmare a unui experiment prin care cercetătorii încercau să afle cum s-ar descurca viermii lați în spațiu dacă li se va tăia capul și coada în prealabil. Se pare că s-au descurcat foarte bine. Unul din 15 s-a întors acasă cu două capete în locul celui pe care-l pierduse.[5]

Viermii spațiali reprezintă doar un exemplu ceva mai impresionant din domeniul tot mai prolific al epigeneticii. Dacă ar fi să oferim o definiție nu foarte riguroasă, epigenetica se ocupă cu studiul tuturor factorilor care determină forma or-

Scanned with OKEN Scanner

ganismelor și care nu depind de genele acestora (vezi caseta 9). Viermii cu două capete sunt identici din punct de vedere genetic cu verii lor clasici, dar arată ca o specie distinctă. Într-adevăr, viermii cu două capete se reproduc și generează alți viermi cu două capete. Nici nu-i de mirare că au existat cercetători surprinși de asta. În cazul de față, principalul cercetător era Michael Levin de la Universitatea Tufts, care se întâmplă să colaboreze și cu grupul nostru de cercetare de la ASU.

Ca să contextualizăm puțin experimentul cu viermii, să ne amintim din capitolul precedent cum dezvoltarea embrionului (morfogeneza) ne oferă un exemplu clar al capacității informației de a controla și modela forma organismului, chiar dacă multe dintre mecanismele implicate rămân un mister. Am explicat că informația necesară construirii și funcționării unui organism se află în mare măsură în capacitatea sistemului de a activa sau dezactiva gene și de a modifica proteinele în urma traducerii instrucțiunilor genetice. Reglarea fluxului de informație prin căi chimice – care implică molecule precum gruparea metil, cozi de histon și micro-ARN (vezi caseta 9) – și conectarea acestui repertoriu de activare/dezactivare a genelor cu o mulțime de tipare chimice aflate în continuă schimbare este, deocamdată, foarte puțin înțeleasă. Astfel, epigenetica deschide un univers întreg de combinații și posibilități. Am precizat că difuzia moleculelor specializate numite morfogeni joacă un rol important în controlarea și desfășurarea dinamicii de dezvoltare, dar se dovedește că aceasta e doar o parte din poveste. În ultimii câțiva ani, a devenit tot mai limpede că morfogeneza presupune un alt mecanism fizic important. Cunoscut sub denumirea de *electro-transducție*, se ocupă de schimbările la nivelul formei organismului provenite din efecte electrice.

Scanned with OKEN Scanner

CASETA 9: DINCOLO DE GENE

Pe parcursul vieții unui organism, genele acestuia sunt activate și dezactivate în funcție de necesitate. Există multe feluri în care o genă poate fi dezactivată. O metodă obișnuită e metilarea, prin care o moleculă mică din gruparea metil se atașează de literele C dintr-o genă și blochează fizic mecanismul de citire a acesteia. O altă metodă e ARNi, un fragment minuscul de ARN, lung de numai 20 de litere, descoperit întâmplător de câțiva botaniști care încercau să obțină flori mai frumoase. În cadrul acestui mecanism, gena e citită ca de obicei din ADN, dar ARNi („i" vine de la interferență) atacă ARN-mesagerul când acesta e ocupat să transporte datele citite la ribozom și îl taie în două, oprind (destul de brutal) mesajul. În organismele complexe, genele pot fi sufocate în regiuni foarte compacte de cromatină.

Pe lângă activarea sau dezactivarea genelor, mai există și alte variabile. O genă exprimată poate produce o proteină care se modifică ulterior. De exemplu, niște proteine numite histone se aglomerează în structuri cu formă de jucărie yo-yo cunoscute sub numele de nucleozomi, în jurul cărora se înfășoară ADN-ul. Un singur cromozom uman poate conține sute de mii de nucleozomi. Acești „yo-yo" nu sunt doar elemente structurale, ci sunt implicați în reglarea genelor. O varietate de molecule mici se pot atașa de histone, formând cozi; există dovezi care arată că aceste etichete moleculare formează ele însele un cod. De asemenea, spațierea dintre nucleozomi de-a lungul catenei de ADN nu e nici regulată, nici aleatorie, și se pare că tiparele poziționale conțin informații importante în sine. Toate aceste variabile sunt foarte complexe, iar detaliile lor nu sunt pe deplin înțelese, dar e limpede că modificările aduse proteinelor *după* producerea lor sunt elemente regulatoare importante din cadrul sistemului prin care celula gestionează informații. O altă complicație e faptul că o „genă" nu e neapărat un segment continuu de ADN, ci poate fi compusă din mai multe elemente. Prin urmare, fragmentul citit de ARN-mesager trebuie să fie tăiat și matisat (*spliced*), astfel încât componentele să fie asamblate corect. În unele cazuri, matisarea se realizează de mai multe ori, ceea ce înseamnă că o singură porțiune de ADN poate scrie cod pentru mai multe proteine în același timp; o proteină este sau nu exprimată în funcție de caracteristicile specifice ale operațiunii

Scanned with OKEN Scanner

de matisare, care e la rândul său gestionată de alte gene și proteine și așa mai departe.

Poate cea mai mare sursă de varietate provine din faptul că (cel puțin la organismele complexe precum animalele și plantele) majoritatea covârșitoare a ADN-ului oricum nu constă în gene care codează proteine. Scopul „sectorului întunecat" de ADN rămâne, deocamdată, neclar. Multă vreme, o parte importantă din segmentele de ADN noncodificant au fost considerate „deșeu", ca și cum nu ar fi avut nici o funcție biologică utilă. Însă apar tot mai multe dovezi care arată că multe așa-zise „deșeuri" joacă un rol crucial în producerea altor tipuri de molecule, precum catenele scurte de ARN, care reglează multe funcții celulare. Treptat, celulele încep să arate ca niște structuri tot mai complexe. Descoperirea tuturor acestor factori cauzali care nu sunt localizați în gene face parte din domeniul epigeneticii. S-ar părea că epigenetica e cel puțin la fel de importantă precum genetica în studiul formelor și funcțiilor biologice.

Amintindu-ne vag de monstrul lui Frankenstein, se pare că electricitatea chiar este o forță vitală, dar nu tocmai așa cum și-a imaginat-o Mary Shelley (sau, mai bine zis, cum și-a imaginat Hollywoodul adaptarea poveștii). Majoritatea celulelor au o mică sarcină electrică și își păstrează această stare pompând ioni încărcați pozitiv (în general protoni și sodiu) din interior către exterior prin membrana celulară, creând o sarcină negativă. Valoarea tipică a diferențelor de potențial de-a lungul membranei e cuprinsă între 40 și 80 de milivolți. Deși nu pare o valoare ridicată, membrana e atât de subțire, încât micul gradient de voltaj constituie un câmp electric local enorm (mai mare decât cele găsite aproape de suprafața Pământului în timpul unei furtuni cu fulgere), câmp pe care putem chiar să-l măsurăm. Folosind pigmenți fluorescenți sensibili la variațiile de tensiune, cercetătorii pot surprinde în fotografii tiparele acestui câmp.

Într-o serie de experimente spectaculoase de la Universitatea Tufts, Michael Levin (cel cu viermii spațiali) a demonstrat că tiparele electrice sunt importante pentru sculptarea

Scanned with OKEN Scanner

morfologiei finale a unui organism în timpul dezvoltării sale. Variațiile de tensiune din regiuni întinse ale corpului joacă rolul de „pre-tipare": schele geometrice invizibile care dirijează expresia descendentă a genelor și influențează astfel parcursul dezvoltării. Prin manipularea diferențelor de potențial electric din anumite celule, Levin poate influența procesul de dezvoltare, creând monștri la comandă: broaște cu picioare și ochi în plus, viermi cu capul în locul cozii și așa mai departe.*

Există o serie de experimente în cadrul cărora sunt cercetați mormolocii de *Xenopus*, broasca africană cu gheare. Embrionii normali dezvoltă un tipar de pigmentare caracteristic după ce o fracțiune din celulele din zona mediană a capului și trunchiului încep să producă melanină. Levin a tratat embrionii cu ivermectină, un agent antiparazitar comun care depolarizează electric celulele schimbând sensul fluxului de ioni dintre celulă și mediul înconjurător. Modificarea proprietăților electrice ale așa-numitelor celule-instructor a avut un efect puternic, făcând celulele pigmentate să o ia razna, împrăștiindu-se ca un cancer în regiuni îndepărtate ale embrionului. Un mormoloc perfect normal a dezvoltat un melanom metastatic numai din pricina intervenției electrice, în absența carcinogenilor sau mutațiilor. Faptul că tumorile pot fi activate strict epigenetic contrazice teoria dominantă conform căreia cancerul e rezultatul afecțiunilor genetice, subiect pe care îl voi discuta mai târziu în acest capitol.

---

* Cu toate că electricitatea constituie un element-cheie, câmpul morfogenetic din acest caz nu e un câmp electric în sens obișnuit, care se extinde pe întregul țesut aflat în dezvoltare. În schimb, e un câmp de polarizare electrică a celulelor. „Polarizarea" e cuvântul folosit pentru a descrie diferențele de tensiune din membrana celulei. Dacă diferența de tensiune variază de la celulă la celulă și de la un loc la altul, se poate spune că există un câmp electric de polarizare care se întinde prin tot țesutul aflat în dezvoltare. Fizicienii vor observa că polarizarea e un câmp scalar, în vreme ce câmpurile electrice sunt câmpuri vectoriale.

Scanned with OKEN Scanner

Toate aceste lucruri sunt remarcabile în sine. Dar ne așteaptă o surpriză și mai mare. Într-un experiment diferit de la Universitatea Tufts, conceput de Dany Adams, un microscop a fost prevăzut cu un aparat care putea să filmeze imagini de tip *time-lapse* cu tiparele electrice schimbătoare din timpul dezvoltării embrionilor de *Xenopus*. Rezultatul a fost spectaculos. Filmul începe cu un val de polarizare electrică ce se deplasează de-a lungul întregului embrion în aproximativ 15 minute. Apoi apar diferite regiuni și pete de hiperpolarizare și depolarizare care se înfășoară între ele pe măsură ce embrionul își reorganizează structura. Regiunile hiperpolarizare marchează poziția viitoare a gurii, nasului, urechilor, ochilor și faringelui. Modificând tiparele acestor domenii electrice și monitorizând schimbările din expresia genelor și realizarea tiparelor feței, cercetătorii au tras concluzia că tiparele electrice *prefigurează* structurile programate să iasă la suprafață mult mai târziu în procesul de dezvoltare, lucru cu atât mai surprinzător având în vedere aspectul viitoarei broaște. Acest pretipar electric pare să ghideze morfogeneza, stocând cumva informația despre forma finală tridimensională și permițând regiunilor depărtate ale embrionului să comunice între ele și să ia decizii cu privire la creștere și morfologie.

Dezvoltarea embrionului e un exemplu grăitor de morfogeneză biologică. Un altul e regenerarea. Unor animale le crește la loc coada, ba își pot regenera chiar membre întregi dacă le pierd dintr-un motiv sau altul. Și în cazul de față e implicată electricitatea. Creatura pe care a ales să experimenteze Levin e un tip de vierme lat numit planaria (specia „viermilor spațiali" de mai devreme). Aceste animale minuscule au un cap cu ochi și creier, iar în partea cealaltă au o coadă. Planaria sunt preferații profesorilor pentru că, dacă sunt tăiați în două, nu mor. În schimb, scrie, Levin,

> rana din jumătatea posterioară e înlocuită cu un cap, în vreme ce rana din partea anterioară formează o coadă. Două structuri complet

Scanned with OKEN Scanner

diferite sunt construite din celule care, până la momentul tăierii, împărtășeau toate aspectele mediului local. Astfel, anumite semnale cu rază lungă de acțiune încă prea puțin înțelese permit celulelor din zona rănii să știe unde sunt localizate, în ce direcție se află rana și care dintre structurile prezente în fragmentul cu pricina nu necesită înlocuire.[6]

Levin a descoperit că există un anumit tipar electric pe tot cuprinsul fragmentului tăiat, tot așa cum există de obicei în jurul rănilor. Levin a folosit niște substanțe numite heptanol și octanol, care par să aibă nume de combustibil de rachetă, dar, de fapt, afectează abilitatea celulelor de a comunica electric una cu alta, modificând astfel activitatea circuitului bioelectric care controlează felul în care țesuturile din jurul rănilor își stabilesc identitatea. Astfel, el a reușit să facă un fragment care avea cap să nu-și construiască o coadă, ci un alt cap, creând astfel un vierme cu două capete și nici o coadă (vezi figura 12). Levin poate obține un vierme cu două cozi și nici un cap (ba chiar viermi cu patru capete și patru cozi). Cea mai mare surpriză vine dacă experimentatorii taie un cap al viermelui cu două capete. V-ați putea aștepta ca această operațiune să potolească orice aspirații ale viermelui de a mai avea două capete, dar se dovedește că, dacă restul de vierme e tăiat în două, vor apărea doi viermi noi cu două capete. E un exemplu grăitor de *moștenire epigenetică* în acțiune (vezi caseta 10). Elementul-cheie e că toți acești viermi ciudați au *secvențe de ADN identice*, însă fenotipuri drastic diferite. Pornind doar de la morfologie, un vizitator de pe Marte i-ar clasifica drept o specie diferită. Însă, cumva, proprietățile fizice ale organismului (în acest caz, stările stabile ale circuitelor electrice) transmit informații morfologice modificate de la o generație la alta.

Ajungem la două întrebări importante: *unde* e stocată informația morfologică în aceste creaturi și cum e moștenită din generație în generație? Evident, informația nu e în gene, care sunt identice. ADN-ul nu codează în mod direct forma (înfățișarea anatomică) sau regulile de reparare a formei în caz de

Scanned with OKEN Scanner

Figura 12 Vierme cu două capete creat de Michael Levin la Universitatea Tufts prin manipularea polarității electrice. Când e tăiat, viermele produce doi viermi cu două capete, ca și cum ar fi o specie diferită, chiar dacă are același ADN ca al viermilor normali, care posedă un singur cap.

vătămare. Cum știu țesuturile să reconstruiască, de pildă, capul unui vierme planaria și să se oprească atunci când ajung la dimensiunea corectă? Explicația reducționistă standard e aceea de a atribui capacitățile regenerative ale organismului unui grup de instrucțiuni genetice moștenite, de genul „uite ce faci dacă ești tăiat în două: construiești o coadă nouă dacă ai pierdut-o pe cea inițială“ și așa mai departe. Dar dat fiind că un vierme planaria cu două capete are *același* set de gene precum unul normal, cum îi spune un vierme bicefal tăiat ciotului său „construiește un cap“, sfidând protocolul obișnuit, care spune „construiește o coadă“? Ce fel de aparat epigenetic

Scanned with OKEN Scanner

e adaptat de modificările electrice de moment, dar rămâne nealterat de la o generație la alta chiar și după ce substanța introdusă de Levin este eliminată?

Cea mai mare problemă din acest caz nu e identificarea regiunilor ocupate de anumite proteine, ci felul în care sistemul *ca întreg* procesează informații despre dimensiune, formă și topologie la o scară mult mai mare decât oricare celulă individuală. E nevoie de o perspectivă de sus în jos care să se concentreze asupra fluxului de informație și asupra mecanismului de codare a formelor unor structuri mari și complexe. Până acum însă, codul respectiv și natura semnalelor care oferă instrucțiunile de construire și reparare rămân un mister. O modalitate de a avansa e să ne imaginăm că există un fel de „câmp de informație" ce străbate organismul modificat de Levin și colaboratorii săi și sădește cumva detalii despre proprietățile la scară largă a ciudatei creaturi în devenire, inclusiv despre forma sa tridimensională. Deocamdată, nimeni nu înțelege acest mecanism. În opinia lui Levin, este vorba despre o „morfologie-țintă" preexistentă care dirijează diferite semnale de modulare a formei și care e stocată, interpretată și implementată de o combinație de procese chimice, electrice și mecanice ce acționează simultan:

> „Morfologia-țintă" este tiparul stabil în direcția căruia se va dezvolta sau regenera un sistem după ce e perturbat. Cu toate că nu e încă înțeleasă din punct de vedere mecanic, regenerarea încetează exact în momentul în care se termină construirea structurii corecte la dimensiunile corecte, ceea ce indică o coordonare a creșterii locale cu dimensiunea gazdei.[7]

Înțelegerea dezvoltării formelor biologice complexe are aplicații medicale extrem de importante (de la defectele congenitale până la cancer). Dacă aceste forme sunt mediate cel puțin parțial de tipare electrice sau de orice fel de codare pe care am putea s-o rescriem (lăsând celulele să construiască după in-

Scanned with OKEN Scanner

strucțiuni), avem șansa să corectăm și să controlăm diferite patologii. Idealul medicinei regenerative e să poată reconstrui organe întregi. De fapt, ficatul uman revine la dimensiunile sale normale după rezecție. Din nou, nu știm cum acest organ reușește să ajungă din nou la forma potrivită. Dacă aceeași regenerare ar putea fi extinsă la nervi, la țesuturi cranio-faciale sau chiar la membre, rezultatele ar fi uluitoare. Însă atingerea acestor obiective necesită o mult mai bună înțelegere a sistemelor vii ca entități coerente și computaționale care înmagazinează și procesează informații despre forma și mediul lor. Mai presus de toate, trebuie să descoperim felul în care tiparele informaționale (electrice, chimice și genetice) interacționează și sunt traduse în fenotipuri specifice.

Electro-transducția e doar un exemplu al felului în care forțele fizice pot influența expresia genelor. Presiunea mecanică sau stresul ce acționează asupra unei celule ca întreg poate produce uneori modificări la nivelul proprietăților fizice sau al comportamentului celulei. Un exemplu bine cunoscut e inhibiția de contact. Celulele dintr-un vas Petri se vor diviza fără probleme dacă sunt tratate bine și primesc substanțe nutritive, însă diviziunea se va opri dacă celulele devin claustrofobe, așa cum se întâmplă atunci când colonia se confruntă cu o limită și populația crește prea mult. Celulele canceroase dezactivează inhibiția de contact și, totodată, suferă schimbări drastice din punctul de vedere al formei și rigidității atunci când părăsesc tumora principală și se răspândesc în restul corpului. Un alt exemplu: când o celulă stem e așezată lângă o suprafață dură, va exprima gene diferite decât dacă ar fi introdusă într-un țesut moale, influențând tipul de celulă în care se diferențiază, un fenomen cu importanță evidentă în embriogeneză. În comunitatea cercetătorilor oncologi circulă un aforism popular: „Lucrul pe care îl atinge o celulă determină ce va face respectiva celulă". Mecanismul din spatele acestui tip de fenomene e cunoscut sub numele de mecano-transducție, ceea ce

Scanned with OKEN Scanner

înseamnă că un semnal mecanic extern (o forță fizică grosieră) e transdus, ca reacție, în expresie genică modificată.[8]

Viermii spațiali cu două capete ne oferă un exemplu grăitor al mecano-transducției în condiții de gravitație zero. O altă minune a spațiului provine de la universitatea mea și din experimentele lui Cheryl Nickerson, care lucrează cu NASA ca să studieze modificările în expresia genică la microbi când pătrund în orbita Pământului. Până și modesta bacterie salmonella poate simți cumva că plutește în spațiu și își schimbă în mod corespunzător expresia genică.[9] Această descoperire are implicații evidente pentru sănătatea astronauților, pentru că un microb agresiv ținut sub control pe Pământ ar putea îmbolnăvi grav pe cineva în spațiu. Relevant este și faptul că oamenii poartă, în mod normal, cam o mie de miliarde de microbi înăuntrul lor, mulți în intestin; totalitatea lor formează microbiomul nostru. Microbiomul joacă un rol important în sănătate. Dacă apar schimbări în expresia genică din microbiom provocate de perioade de timp lungi petrecute în condiții de gravitație zero sau scăzută, acest lucru poate însemna un obstacol serios în calea zborurilor spațiale de lungă durată.[10]

Dați-mi voie să amintesc alte câteva descoperiri interesante în finalul acestei secțiuni. Salamandrele sunt recunoscute pentru capacitatea de a-și regenera membre întregi. Se pare că, dacă piciorul sacrificat are cancer și e tăiat în regiunea tumorii, noul picior nu va suferi de cancer. Bineînțeles, morfologia membrelor, codată cumva în restul membrului, e reprogramată astfel încât să producă un picior sănătos. Acest lucru contravine întru câtva perspectivei generale conform căreia proliferarea rapidă a celulelor (o caracteristică a regenerării membrelor) reprezintă un risc de cancer (cancerul e descris uneori drept „o rană care nu se vindecă niciodată"). De fapt, multe studii au arătat și capacitatea embrionilor de a îmblânzi celulele canceroase agresive. O altă ciudățenie o reprezintă coarnele cerbilor, care cad și cresc la loc în fiecare an. La unele

Scanned with OKEN Scanner

specii de cerb, dacă facem o incizie în coarne, cele de anul viitor vor creşte cu tot cu o ramură ectopică (ca un dinte de furcă) în acelaşi loc.* Ne întrebăm: unde anume în organismul cerbului e stocată „informaţia inciziei"? Cu siguranţă nu în coarne, care cad. Să fie în cap? Cum ştie capul unui cerb că una dintre coarnele sale are o incizie la jumătate de metru de el şi cum stochează celulele din scalp o hartă a structurii ramificate astfel încât să ştie precis unde se află incizia? E ciudat! În cutia enigmatică a vieţii, moştenirea epigenetică reprezintă unul dintre cele mai misterioase elemente.

CASETA 10: MOŞTENIREA EPIGENETICĂ

În cadrul unei serii de experimente legate de moştenirea genetică a mutilării, biologul german August Weissmann a tăiat cozile şoarecilor pe parcursul mai multor generaţii, dar nu a reuşit niciodată să obţină un şoarece fără coadă – o lovitură dată teoriei lamarckiene a evoluţiei prin moştenirea caracteristicilor dobândite. Cu toate astea, recenta înflorire a studiului epigeneticii zugrăveşte o imagine mai nuanţată. În cadrul corpului, tipul unei celule e conservat când celula se divide: dacă, de exemplu, se reproduce, o celulă din ficat creează două celule hepatice, nu una hepatică şi una epitelială; prin urmare, markerii epigenetici (de exemplu, tiparele de metilare) care determină expresia genică („Tu vei fi o celulă hepatică!") vor fi transmişi celulelor-fiică. Însă cum rămâne cu modificările epigenetice transmise de la o generaţie *a întregului organism* la următoarea, de exemplu de la mamă la fiu? E o chestiune total diferită. Dacă ar avea loc, ar lovi la însăşi temelia evoluţiei darwiniene. Nu ar trebui să existe nici un mecanism care să permită modificărilor aduse corpului unui organism să ajungă în linia sa germinală (spermă şi ovule) şi să-i afecteze urmaşii. Totuşi, dovezile în favoarea moştenirii epigenetice intergeneraţionale s-au aflat dintotdeauna în faţa biologilor. Când un măgar mascul e încrucişat cu o iapă, rezultatul e un catâr (steril). Dacă o femelă de măgar e încrucişată cu un cal, rezultatul e un bardou.

* Nu există încă teste care să verifice dacă puiul moşteneşte această schimbare.

Scanned with OKEN Scanner

Catârii și bardoii sunt identici din punct de vedere genetic, dar arată foarte diferit: sunt diferiți din punct de vedere epigenetic, astfel încât trebuie să poarte determinanți epigenetici care depind de sexul părinților lor. Au mai fost descoperite și alte exemple în care genele părinților sunt întipărite cu urme moleculare epigenetice care reușesc să ajungă în celulele germinale și să supraviețuiască procesului reproductiv. În plus, botaniștii cunosc multe cazuri în care schimbările epigenetice acumulate pe timpul vieții unei plante sunt transmise generațiilor următoare. Unele studii au descoperit până și la oameni indicii care confirmă un lucru asemănător. Un exemplu sunt familiile de olandezi care au suferit de înfometare în al Doilea Război Mondial pentru că Aliații trecuseră de ele și nu au reușit să primească alimente. Copiii supraviețuitorilor s-au născut cu o greutate corporală sub medie și au avut o înălțime sub medie toată viața. În plus, se pare că și copiii ultimilor sunt mai mici.

Așadar, unde se află, mai exact, epigenomul? Genele sunt obiecte fizice cu o poziție clară în celulă: o anumită genă se află într-o anumită poziție în ADN. Pot fi văzute la microscop. Când vine vorba de epigenetică însă, nu există nici un „epigenom" în același sens fizic, nici un obiect bine definit care se află într-un loc anume din celulă. Procesarea și controlul informației epigenetice sunt distribuite pe tot cuprinsul celulei (și poate chiar dincolo de ea). E un fenomen global, nu local, la fel ca în cazul analogului celular al unității de supraveghere Von Neumann despre care am vorbit în capitolul precedent.

Flirtând cu lamarckismul

Norocul e de partea genomului pregătit.
—Lynn Caporale[11]

Cu zeci de ani înainte ca Darwin să publice *Originea speciilor*, un biolog francez a conceput o teorie a evoluției foarte diferită. Numele său era Jean-Baptiste Lamarck. Esența evoluției lamarckiene este cea potrivit căreia trăsăturile căpătate de un organism pe parcursul vieții pot fi moștenite de urmașii săi. Astfel, dacă un animal face eforturi într-o direcție sau alta

Scanned with OKEN Scanner

(încearcă să alerge mai repede, să ajungă mai sus etc.) în lupta continuă pentru supraviețuire, puii acestuia vor moșteni o ușoară îmbunătățire în direcția respectivă (viteză puțin mai mare, înălțime puțin mai mare). Dacă această teorie e corectă, am găsi mecanismul pentru schimbările rapide menite să îmbunătățească organismul. Mama mea remarca deseori că i-ar prinde bine încă o pereche de mâini pentru treburile gospodărești. Închipuiți-vă că, drept urmare a acestei nevoi, copiii ei s-ar fi născut cu patru brațe! De cealaltă parte, teoria lui Darwin spune că mutațiile sunt oarbe: nu au nici o legătură cu nevoile sau circumstanțele organismului care le poartă. Dacă o mutație rară conferă un avantaj, atunci e doar noroc chior: nu există progres într-o anumită direcție sau vreun mecanism sistematic orientat spre îmbunătățire.

Evoluția ar funcționa, fără îndoială, mai repede și mai eficient dacă natura ar produce exact mutațiile folositoare, așa cum își închipuia Lamarck. Cu toate astea, vechii biologi au respins această idee pentru că ar semăna prea mult cu mâna călăuzitoare a lui Dumnezeu, preferând să facă în schimb apel la hazard drept unică explicație a varietății. Și așa au stat lucrurile vreme de mai multe decenii. Acum însă, au început să apară îndoieli. Viermii ciudați ai lui Levin sunt, fără îndoială, un exemplu limpede de moștenire a unor caracteristici dobândite (în cazul de față, dobândite prin ciopârțire în laborator). Cunoaștem multe alte exemple. Prin urmare, a sosit oare momentul să abandonăm darwinismul și să îmbrățișăm lamarckismul?

Nimeni nu poate nega faptul că selecția naturală încurajează supraviețuirea celui mai adaptat. Organismele prezintă variații, iar natura îl alege pe cel mai adaptat. Însă au existat dintotdeauna nelămuriri iritante. Natura nu poate lucra decât cu variantele pe care le are la dispoziție, iar o întrebare fundamentală pe care trebuie s-o punem e cum apar aceste variante. Bun, supraviețuirea celui mai adaptat, dar cum rămâne cu

Scanned with OKEN Scanner

apariția celui mai adaptat, cum s-a exprimat botanistul olandez Hugo de Vries în urmă cu un secol? Biologia e plină de inovații remarcabile, cu consecințe profunde: fotosinteza, scheletul osos al vertebratelor, zborul păsărilor, polenizarea insectelor, semnalele neuronale sunt doar câteva dintre ele. Problema felului în care viața generează atâtea soluții ingenioase pentru a supraviețui este astăzi subiectul unor cercetări intense.[12] Dacă ceva funcționează bine, foarte probabil că schimbările aleatorii îi vor face mai mult rău decât bine. Chiar și pe parcursul a trei sau patru miliarde de ani, e oare posibil ca atât de multă complexitate organizată (ochi, creier, fotosinteză) să fi apărut *numai* prin variație aleatorie și selecție naturală?[13]

De-a lungul timpului, mulți oameni de știință și-au exprimat scepticismul în această privință. „Un model probabilistic simplu nu ar fi suficient pentru a genera diversitatea fantastică pe care o vedem“,[14] scria Wolfgang Pauli, fizician și contemporan al lui Schrödinger. Până și biologi distinși și-au exprimat îndoielile. Theodor Dobzhansky a scris: „Cea mai serioasă obiecție adusă teoriei moderne a evoluției este cea potrivit căreia, din moment de mutațiile se petrec «întâmplător» și fără o direcție anume, e greu de înțeles cum pot mutația și selecția să contribuie la formarea unor organe atât de superb echilibrate precum ochiul omenesc“.[15] Multe dintre aceste probleme ar dispărea dacă în lume ar opera măcar câteva vestigii ale evoluției lamarckiene.

În 1988, un grup de biologi de la Harvard au susținut că au fost martorii unui exemplu concludent al apariției celui mai adaptat. O echipă condusă de John Cairns a afirmat că „e posibil ca celulele să aibă mecanisme prin care aleg care mutații să aibă loc și care nu“.[16] *Aleg*? Publicat în *Nature* și provenind de la un laborator foarte respectabil, anunțul a stârnit consternare. Pentru a le înțelege experimentele, amintiți-vă că bacteriei *E. coli* îi place să mănânce glucoză, dar poate acționa un comutator care să-i permită, la nevoie, să metabolizeze mai

Scanned with OKEN Scanner

puțin gustoasa lactoză. Grupul lui Carin a lucrat cu o tulpină mutantă de *E. coli* care era incapabilă să proceseze lactoza, apoi a provocat bacteriile să urmeze o dietă bazată doar pe lactoză. Cercetătorii au observat că unele dintre bacteriile înfometate au suferit mutații spontane și au putut să se hrănească cu lactoză. În sine, acest fenomen nu reprezintă o amenințare pentru „darwinismul ortodox", atât timp cât respectivele mutații sunt doar întâmplări norocoase. Însă, când au aflat care erau șansele ca așa ceva să se petreacă, cercetătorii de la Harvard au tras concluzia că bacteriile lor au avut un succes neobișnuit de mare, depășind cu mult orice s-ar datora purei întâmplări. Aceștia s-au întrebat dacă genomul unei celule individuale poate să profite de pe urma experienței,[17] cum crezuse Lamarck. În opinia lor, răspunsul ar putea fi afirmativ, având în față un exemplu de mutații „«direcționate» spre un obiectiv folositor".

Ca reacție la furoarea stârnită, Carins a efectuat alte câteva experimente care să verifice rezultatul inițial și a revizuit cele mai senzaționale aspecte ale afirmației sale. Însă duhul ieșise din lampă și a urmat o explozie de experimente realizate de grupul lui și de alți cercetători. Multe bacterii *E. coli* au fost astfel înfometate. Iată ce s-a constatat când lucrurile s-au liniștit: mutațiile *nu* sunt aleatorii (partea aceasta e corectă). Bacteriile au anumite „zone fierbinți" de mutație: gene specifice care suferă mutații de sute de mii de ori mai rapid decât media. Acest lucru e folositor dacă pentru bacterii e avantajos să genereze diversitate. Un caz concret este momentul în care acestea invadează un mamifer și trebuie să se lupte cu sistemul imunitar al gazdei. Bacteriile au trăsături superficiale de recunoaștere care au un rol asemănător cu acela al uniformelor soldaților. Sistemul imunitar al gazdei recunoaște agentul patogen după hainele pe care le poartă. O bacterie care își poate schimba uniforma va avea, bineînțeles, un avantaj în lupta pentru supraviețuire: prin urmare, din punct de vedere

Scanned with OKEN Scanner

darwinian, are sens ca „genele-uniformă" să poată suferi mutații foarte ușor. Într-o astfel de situație, bacteriile au dezvoltat anumite „gene de rezervă", care pot suferi mutații mult mai ușor decât alte gene, ceea ce implică o mai mare șansă ca mutațiile să apară la nivelul unor astfel de gene. În cadrul acestui plan de rezervă însă, mutația rămâne în continuare o chestiune de șansă. Nu există nici o dovadă conform căreia bacteriile își „aleg" anumite mutații în funcție de ce au nevoie, așa cum a afirmat inițial Carins.

Un exemplu mai frapant sunt bacteriile care pot activa selectiv rate de mutație mai ridicate în genele care le pot fi de folos. Barbara Wright de la Universitatea din Montana a studiat mutanți ai deja chinuitei *E. coli* care aveau defectă o genă responsabilă de producerea unui anumit aminoacid.[18] În general, noi, oamenii, obținem aminoacizi din hrană, dar dacă suntem înfometați celulele noastre pot crea aminoacizi singure. La fel se întâmplă și în cazul bacteriilor. Wright s-a întrebat cum ar reacționa o bacterie înfometată cu o genă de aminoacizi defectă. Bacteria primește semnalul „avem nevoie de aminoacizi acum", însă gena defectă produce aminoacizi imperfecți. Cumva, celula simte pericolul și crește rata de mutație a genei respective. Majoritatea mutațiilor înrăutățesc lucrurile. Însă, într-o colonie de bacterii flămânde, există acum mari șanse ca una dintre ele să aibă noroc și să sufere exact mutația necesară pentru a repara defectul, iar celula aceea salvează situația. Primește echivalentul bacterian al unei perechi suplimentare de mâini. Acest tip de mutație se numește mutație „adaptativă", pentru că face organismul să fie mai bine adaptat la mediu.

Un vechi pionier al mutațiilor adaptative e Susan Rosenberg, care lucrează acum la Baylor College of Mediine din Houston, Texas. Pana Rosenberg și colegii săi și-au propus să afle cum reușesc bacteriile înfometate să-și creeze un colac de salvare prin mutații cu o asemenea eficiență incredibilă. Aceș-

Scanned with OKEN Scanner

tia s-au concentrat asupra reparării rupturilor dublu-catenare ale ADN-ului – o sarcină interminabilă de care celulele au nevoie pentru a-şi continua funcţionarea normală.[19] Există multe metode prin care se repară astfel de lacune, unele calitative, altele mai puţin. Rosenberg a descoperit că bacteriile înfometate pot trece de la un proces de reparare cu fidelitate mare la unul stângaci. Acest lucru afectează fiecare parte a rupturii, până la 60.000 de baze sau mai multe – o insulă de vandalism autoprovocat. Rosenberg a identificat genele necesare organizării şi controlării acestui proces. Se dovedeşte că sunt foarte vechi. Bineînţeles, deturnarea deliberată a reparării ADN-ului e un mecanism de supravieţuire ale cărui origini dispar în negura istoriei biologice. Regenerând nenumăraţi mutanţi în acest fel, colonia de bacterii îşi îmbunătăţeşte şansele ca măcar o celulă-fiică să găsească accidental soluţia corectă. Selecţia naturală face restul. Practic, bacteriile stresate îşi proiectează propria evoluţie la mare viteză prin generarea din mers a diversităţii genomice.

Oare experimentale lui Rosenberg ne sugerează că aceste bacterii ar putea genera şi mutaţiile „corecte" într-un regim mai mult decât pur întâmplător, aşa cum considera iniţial Cairns? Oare cei mai adaptaţi „apar" cu o eficienţă prevăzută? Chestiunea nu poate fi rezolvată printr-un simplu da sau nu. E adevărat că celulele nu se apucă să sufere mutaţii de la un capăt la altul: mutaţiile înalte nu sunt distribuite uniform în cadrul genomului. Cu toate astea, Rosenberg a confirmat că există unele „zone fierbinţi" mai predispuse să găzduiască genele necesare pentru a evolua şi a scăpa din bucluc. Şansa ca zonele fierbinţi să facă acest lucru e prea mare pentru a fi o simplă coincidenţă. Dar, spre deosebire de mecanismul foarte concentrat descoperit de Barbara Wright, care ţinteşte doar genele defecte ce se exprimă greşit, mutaţiile lui Rosenberg afectează la fel *toate* genele din zonele fierbinţi, indiferent dacă se chinuie să scoată proteine din ele sau nu au nici un fel de

Scanned with OKEN Scanner

activitate. În acest sens, e un mecanism mai rudimentar, dar totodată mai versatil.

Iată o analogie. Imaginați-vă că sunteți prizonieri într-o clădire care arde. Vă gândiți că undeva trebuie să existe o fereastră care să se deschidă și prin care să scăpați – dar care dintre ele? Poate că sunt 12 ferestre. O persoană cu adevărat inteligentă ar fi conceput dinainte o procedură de evacuare în caz de incendiu, pentru orice eventualitate. Dar voi nu ați făcut asta. Care e al doilea cel mai inteligent lucru de făcut? Bineînțeles, să încercați fiecare fereastră pe rând. În lipsa oricăror alte informații, o procedură de încercare aleatorie e la fel de bună ca oricare alta. O prostie reală ar fi să alergați *complet* la întâmplare prin clădire, intrând în dulapuri și strecurându-vă sub paturi. O procedură aleatorie țintită e mai eficientă decât o procedură complet aleatorie. Ei bine, bacteriile nu sunt extrem de inteligente, dar nu sunt nici extrem de proaste: își concentrează eforturile acolo unde e cel mai probabil să obțină rezultate avantajoase.

Cum a apărut toată această magie a mutațiilor? Privind în retrospectivă, fenomenul nu e prea surprinzător. E limpede că evoluția va funcționa mult mai bine dacă mecanismele sale sunt flexibile și pot evolua *la rândul lor* – fenomen numit deseori evoluție a capacității evolutive. Cu mult, mult timp în urmă, celulele care ar fi avut capacitatea de a scăpa de dificultăți prin evoluție ar fi avut un avantaj. Un mecanism de îmbunătățire a evoluției care se activează când condițiile o cer și se dezactivează după ce momentul dificil a trecut e o trăsătură folositoare. Răspunsul adaptativ la stres* e aproape cu siguranță un mecanism străvechi (de fapt, un grup de mecanisme care presupun o gamă întreagă de procese, de la cele aleatorii

---

* Aici și în restul capitolului, „stresul" nu se referă, bineînțeles, la o stare mentală, ci la circumstanțe în care o celulă sau un organism e amenințat sau provocat în vreun fel: de exemplu, prin înfometare sau rănire.

Scanned with OKEN Scanner

la cele concentrate și direcționate) care a evoluat din motive biologice întemeiate. Biologul Eva Jablonka consideră mutațiile adaptative „căutări informate". Ea conchide că „șansele celulei de a găsi o soluție prin mutație sunt amplificate deoarece trecutul său evolutiv a construit un sistem care oferă indicii inteligente cu privire la locul și momentul în care să genereze mutațiile".[20] E important să înțelegem că aceasta nu e o falsificare a darwinismului, ci o elaborare a sa. Acesta e darwinismul 2.0. Biochimisul Lynn Caporale scrie: „Respingerea variației genetice complet aleatorii ca substrat al evoluției genomului nu constituie o negare a teoriei selecției naturale elaborate de Darwin și Wallace, ci oferă o mai profundă înțelegere a acesteia".[21] Nuanțarea generată de aceste experimente cu tentă lamarckiană e aceea că natura alege nu doar cele mai adaptate organisme, ci și *cele mai adaptate strategii de supraviețuire.*

Ideile mai sus-menționate ilustrează felul în care organismele folosesc informația din trecut pentru a cartografia viitorul. Această informație e moștenită atât în timp (de exemplu genele de rezervă despre care am discutat), cât și epigenetic, de la generația anterioară. Prin urmare, viața poate fi descrisă ca o curbă de învățare informațională ce se avântă în sus. Organismele nu trebuie să trăiască prin încercare și eroare și „să reinventeze roata" la fiecare generație. Ele pot profita de pe urma experiențelor din trecut. Această tendință se află în puternică opoziție cu a doua lege a termodinamicii, care ne spune o poveste despre degenerare și descompunere.

Demonii din gene

Deși sunt surprinzătoare, mutațiile adaptative tot presupun faptul că genomurile sunt de multe ori victimele pasive ale unor fenomene provocate din exterior în mod aleatoriu. Mecanismul e în continuare dependent de elemente întâmplătoare. Dar dacă celulele aflate în dificultate n-ar trebui să se bazeze deloc pe

Scanned with OKEN Scanner

forţe exterioare pentru a provoca mutaţiile? Dacă acestea şi-ar putea *manipula propriul genom*?

De fapt, e limpede că pot s-o facă. Reproducerea sexuată implică anumite reconfigurări importante ale genomurilor, unele aleatorii, altele supravegheate. Există multe metode interconectate unde celulele îşi amestecă propriul ADN într-un mod bine pus la punct. De fapt, sexul nu e singurul exemplu. Corectarea erorilor care se produc în timpul replicării ADN-ului presupune încă un set de operaţiuni genomice de gestionare. Majoritatea vătămărilor importante suferite de ADN (de exemplu prin radiaţie sau perturbare termică) nu ajung niciodată la celulele-fiică pentru că sunt mai întâi reparate. În absenţa corecturii şi redactării ultraperformante (care reduc rata de mutaţie netă la valoarea incredibilă de la unu la 10 miliarde), ADN-ul uman ar suferi o serie de mutaţii devastatoare (estimate la aproximativ 1% eroare de copiere la fiecare generaţie). Prin urmare, celulele sunt capabile să monitorizeze şi să-şi editeze genomul la un nivel înalt de fidelitate în încercarea de a păstra statu-quoul.

Dar acum vine o întrebare fascinantă: pot celulele să-şi editeze genomurile pentru a *schimba* statu-quoul? Cu zeci de ani înainte de cercetările lui Cairns şi Rosenberg, această chestiune a fot investigată în cadrul unei serii de experimente remarcabile de către distinsul botanist şi biolog Barbara McClintock. Încă de pe vremea studenţiei, în anii '20, McClintock a făcut experimente cu plante de porumb şi a stabilit multe dintre proprietăţile fundamentale ale structurii şi organizării cromozomului pe care le cunoaştem astăzi, descoperiri pentru care a fost distinsă cu Premiul Nobel pentru Fiziologie sau Medicină – prima femeie care a câştigat premiul la această categorie fără să-l împartă cu cineva. Cu ajutorul unui microscop rudimentar, McClintock a văzut ce se întâmplă cu cromozomii de porumb când sunt expuşi la raze X. Descoperirile ei au stârnit un asemenea scandal şi au atras atât de mult scep-

Scanned with OKEN Scanner

ticism încât, în 1953, s-a simțit nevoită să nu-și mai publice datele obținute. De necontestat însă au fost observațiile sale despre cum cromozomul se rupe în fragmente atunci când e iradiat. Însă marea surpriză a fost faptul că fragmentele puteau forma din nou un întreg, de multe ori într-un aranjament nou. Reorganizarea cromozomului părea letală, și de multe ori chiar era. Dar nu întotdeauna: în unele cazuri, plantele mutante și-au reprodus genomul extrem de modificat. Descoperirea esențială a lui McClintock a fost că mutațiile la scară mare erau departe de a fi aleatorii. Celulele de porumb dădeau impresia că au un plan de rezervă pentru momentul în care genomul lor ar fi fost zdrobit. În mod mult mai surprinzător, dacă plantele erau supuse stresului (de exemplu, printr-o infecție sau prin vătămări mecanice), putea avea loc ruperea *spontană* a cromozomilor în absența intervenției cu raze X. Capetele rupte se lipeau la loc după ce cromozomul se reproducea. În 1948, McClintock a făcut cea mai uimitoare descoperire a sa. Segmentele de cromozom puteau fi transpuse (își puteau schimba locul în genom), un fenomen care poartă numele popular de „gene săritoare". La porumb, rezultatul era un tipar sub forma unui mozaic colorat.

Astăzi, se consideră că transpozițiile genomice sunt larg răspândite în evoluție. S-a estimat că până la jumătate din genomul uman a executat această gimnastică genetică. Cercetătorii oncologi sunt și ei foarte familiarizați cu transpozițiile. Un exemplu foarte studiat e cromozomul Philadelphia (numit după locul în care a fost descoperit), care poate provoca leucemia la oameni: este vorba despre un fragment de cromozom 9 transpus în locul unui fragment de cromozom 22. În unele cancere în fază terminală, cromozomii pot deveni aproape de nerecunoscut, realizând întregi rearanjamente, inclusiv duplicate ale unui cromozom întreg și fragmente de sine stătătoare care înlocuiesc aranjamentul ordonat din celulele sănătoase. Un caz extrem se numește cromotripsă; în acest caz,

Scanned with OKEN Scanner

cromozomii se dezintegrează în mii de bucăți, care se rearanjează și formează monștri de nerecunoscut.

Deși s-a admis fără tragere de inimă că McClintock are dreptate, rezultatele ei au rămas tulburătoare deoarece implică faptul că o celulă poate fi un agent activ în cadrul propriei schimbări genomice. E evident că McClintock însăși credea asta. Cu ocazia decernării Premiului Nobel, obținut pentru „descoperirea elementelor genetice mobile", a spus următoarele:

> Pare că nu putem evita concluzia potrivit căreia celulele pot simți prezența în propriul nucleu a capetelor de cromozomi rupte, moment în urma căruia activează un mecanism care va strânge laolaltă și apoi va uni aceste capete între ele. [...] Capacitatea unei celule de a simți aceste capete rupte, de a le direcționa unul spre celălalt și apoi de la reuni, astfel încât alipirea dintre două catene de ADN să fie corect orientată, e un exemplu grăitor al sensibilității celulelor față de tot ce se întâmplă în interiorul lor. [...] Un obiectiv pentru viitor ar fi să determinăm câtă cunoaștere are celula despre ea însăși și cum folosește această cunoaștere într-un mod «cumpănit» atunci când se confruntă cu o provocare, [...] monitorizând activitățile genomice și corectând erorile obișnuite, simțind evenimentele neobișnuite și neașteptate și reacționând la ele, deseori prin restructurarea genomului. Știm despre componentele genomurilor care ar putea fi puse la dispoziție pentru o astfel de restructurare. Nu știm însă nimic despre cum celula simte pericolul și cum declanșează reacții care deseori sunt cu adevărat remarcabile.[22]

S-a dovedit că transpoziția și elementele genetice mobile reprezintă numai vârful aisbergului. Când se confruntă cu provocări, celulele au multe modalități de a-și „rescrie" genomul, la fel cum programele de computer se curăță de erori sau sunt actualizate pentru a putea îndeplini noi sarcini. James Shapiro, în tinerețe un colaborator al lui McClintock, a realizat un studiu amănunțit despre mecanismele implicate. Unul dintre ele este transcrierea inversă, unde ARN-ul (care în mod normal transcrie secvențe *din* ADN) poate uneori să-și scrie propria secvență *înapoi în* ADN. Pentru că există multe mecanisme prin

Scanned with OKEN Scanner

care secvențele de ARN să poată fi modificate *după* ce au transcris informația din ADN, transcrierea inversă le permite celulelor să-și altereze propriul ADN prin modificarea ARN-ului. O genă specifică de transcriere inversă care a fost studiată în amănunt este BC_1 ARN, care are un rol important în sistemul nervos al rozătoarelor.[23]

Acum știm că procesele de transcriere inversă au jucat un rol foarte important în evoluție și pot, de exemplu, să explice o mare parte a diferențelor genetice dintre oameni și cimpanzei.

Dar fluxul invers de informație nu se limitează la trecerea de la ARN la ADN. Întrucât repararea genomului e controlată de interacțiuni complexe de la nivelul celulei, decizia „de a repara sau de a nu repara" sau „cum să repar" poate depinde de mai multe proteine care au fost modificate după propria formare. Rezultatul e că proteinele și modificările pe care le-au dobândit pe parcursul ciclului de viață al celulei pot influența conținutul genomic: coada epigenetică dă din câinele genetic. În total, Shapiro a identificat aproximativ zece mecanisme diferite prin care o celulă care operează la nivel de sistem poate afecta conținutul de informație al propriului ADN, un proces pe care îl numește *inginerie genetică naturală*. Rezumatul dogmei centrale a biologiei neodarwiniste e că informația curge de la ADN-ul inert la ARN-ul mobil la proteinele funcționale într-un singur sens. Dacă e să folosim o analogie din domeniul informaticii, genomul darwinian e un fișier de date care poate fi doar citit. Însă cercetările efectuate de McClintock, Shapiro și alții contrazic acest mit și arată că e mai corect să considerăm genomul un sistem de înmagazinare ce poate fi citit și în care se poate scrie.

Varianta darwinismului descrisă în acest capitol ne ajută într-o anumită măsură să explicăm enigma apariției celui mai adaptat. În prezent, există colecții întregi de studii de caz care indică existența diferitor mecanisme, multe cu tente lamarckiene, dar deocamdată nu s-a descoperit nici

Scanned with OKEN Scanner

un principiu sistematic de gestionare a informației care guvernează aceste fenomene. Cu toate astea, e tentant să ne imaginăm că biologii întrevăd un întreg sistem de procesare a informației ascuns la nivel epigenetic. „Numeroasele inovații ale naturii (unele incredibil de perfecte) presupun existența unor principii naturale care accelerează capacitatea vieții de a inova",[24] scrie biologul Andreas Wagner. „Evoluția presupune mai multe lucruri decât se poate observa la prima vedere. [...] Adaptările nu sunt determinate numai de întâmplare, ci de un set de legi care îi permit naturii să descopere noi molecule și mecanisme la o fracțiune din timpul de care ar avea nevoie variația aleatorie."[25] Kevin Laland, biolog la Universitatea St Andrews, e cofondatorul a ceea ce poartă numele de „sinteză evoluționistă extinsă". „E momentul să renunțăm la ideea că genele pe care le moștenim reprezintă un plan în funcție de care ne este construit corpul", scrie el. „Informația genetică e doar un factor ce influențează alcătuirea viitoare a unui individ. Organismele joacă un rol activ și constructiv în propria dezvoltare și în cea a descendenților lor, astfel încât impun o direcție evoluției."[26]

Biologii ortodocși nu acceptă aceste atacuri fără să reacționeze. Erezia lamarckismului va încinge întotdeauna spiritele, iar sinteza evoluționistă extinsă rămâne subiectul unei dezbateri aprinse, la fel ca în cazul afirmației potrivit căreia modificările epigenetice pot fi moștenite de-a lungul generațiilor. Încă nu e clar cât de mult din versiunea „puristă" a darwinismului va trebui adaptată.[27] Ce putem spune e că lupta e departe de a se fi încheiat.

Cancerul: prețul dur al pluricelularității

Genomurile pot suferi schimbări profunde nu doar în decursul a milioane de ani de evoluție, ci și în timpul vieții unui organism. Cel mai dramatic exemplu al celui de-al doilea caz e

Scanned with OKEN Scanner

cancerul, care ucide milioane de oameni în fiecare an. Deşi e o boală cumplită, cancerul ne oferă o perspectivă fascinantă asupra trecutului nostru evolutiv.

Nu există nici o definiţie scurtă şi la obiect a cancerului; în schimb, e caracterizat prin aproximativ zece „caracteristici".[28] La oameni, cancerul în fază avansată poate prezenta toate caracteristicile sau doar câteva dintre ele. Printre ele se numără o rată sporită a mutaţiilor, proliferare nelimitată de celule, oprirea apoptozei (moartea programată a celulelor), evitarea sistemului imunitar, angiogeneza (formarea unor noi vase de sânge), schimbări ale metabolismului şi (cea mai cunoscută din punct de vedere medical şi cea mai problematică) tendinţa să se răspândească în corp şi să colonizeze organe îndepărtate faţă de locul tumorii iniţiale, proces numit metastază.

Cancerul e cel mai studiat subiect din biologie, cu peste un milion de articole pe această temă în ultimii 50 de ani. Prin urmare, s-ar putea să-l surprind pe cititor când spun că nu s-a ajuns la un consens cu privire la ce este cancerul, de ce există şi cum se integrează în povestea mai mare a vieţii pe Pământ. Foarte puţine eforturi au fost făcute pentru înţelegerea cancerului *ca fenomen biologic*, în comparaţie cu importanţa acordată anihilării sale cu orice preţ. Majoritatea eforturilor uriaşe făcute în toată lumea au fost menite să găsească o metodă de a distruge cancerul. Cu toate astea, terapia standard (un amestec de chirurgie, radiaţii şi toxine chimice) s-a schimbat foarte puţin în ultimele decenii.* Cu excepţia câtorva tipuri de cancer, rata de supravieţuire a pacienţilor s-a îmbunătăţit modest sau deloc: prelungirea vieţii prin chimioterapie este, în general, o măsură menită să amâne inevitabilul, care se poate petrece

* De curând, atenţia s-a îndreptat spre o a patra linie de atac: imunoterapia. Această tehnică presupune supraîncărcarea sistemului imunitar al corpului în vederea distrugerii celulelor canceroase. Rezultatele iniţiale au fost promiţătoare, dar e prea devreme să ne dăm seama dacă această metodă va revoluţiona domeniul.

Scanned with OKEN Scanner

în decurs de câteva săptămâni sau luni. Această stare precară a lucrurilor nu poate fi pusă pe seama lipsei de fonduri. Numai guvernul Statelor Unite a cheltuit 100 de miliarde de dolari pentru studierea cancerului din 1971, când președintele Nixon ar fi declarat război acestui tip de maladie; fundațiile caritabile și companiile producătoare de medicamente au adăugat și ele alte miliarde de dolari.

Poate că absența progresului e datorată faptului că oamenii de știință privesc problema în mod greșit. Două prejudecăți frecvente sunt cea potrivit căreia cancerul ar fi o „boală modernă" și cea potrivit căreia ar afecta mai ales oamenii. Nimic n-ar putea fi mai departe de adevăr. Cancerul sau fenomene similare cancerului s-au înregistrat la aproape toate animalele, păsările, reptilele, insectele și chiar și plantele. Athena Aktipis și colaboratorii săi au arătat existența cancerului sau a bolilor analoge cancerului în toate categoriile de metazoare, inclusiv la fungi și corali (vezi figura 13).[29] Cancer s-a găsit și la hidre.[30]

Faptul că această afecțiune e atât de răspândită în rândul diferitelor specii ne indică o origine evolutivă străveche. Strămoșul comun al (să spunem) oamenilor și muștelor datează de acum 600 de milioane de ani, în vreme ce categoriile mai largi de organisme susceptibile la cancer au un punct de convergență vechi de un miliard de ani. Implicația e următoarea: cancerul a existat de când există organisme pluricelulare (metazoare). E o afirmație rezonabilă. E limpede că avem de-a face cu o boală a corpurilor; nu ar avea sens să spunem că o bacterie izolată are cancer. Însă corpurile nu au existat dintotdeauna. Vreme de două miliarde de ani, viața pe Pământ a fost formată numai din organisme unicelulare. Acum aproape 1,5 miliarde de ani, au apărut primele forme pluricelulare, în timpul erei geologice numită Proterozoic.*

---

* Pluricelularitatea a apărut independent de mai multe ori. Adevărata pluricelularitate e o trăsătură restrânsă la eucariote. Cu toate astea,

Scanned with OKEN Scanner

Figura 13 Cancerul în arborele vieții.

Scanned with OKEN Scanner

Trecerea la pluricelularitate a adus cu sine o schimbare fundamentală în logica vieții. În lumea celulelor unice nu există decât o necesitate: replicare, replicare, replicare! Din acest punct de vedere, celulele unice sunt nemuritoare. Creaturile pluricelulare procedează însă diferit. Nemurirea e lăsată pe seama unor celule germinale specializate (de exemplu, ovulele și spermatozoizii), a căror sarcină e să transmită generațiilor viitoare genele organismului. Între timp, corpurile, care sunt vehiculul acestor celule germinale, se comportă foarte diferit. Acestea sunt muritoare. Celulele corpului (cele somatice) păstrează o urmă vagă a nemuririi lor trecute într-o capacitate limitată de a se replica. O celulă epitelială tipică, de exemplu, se poate divide de 50 sau 70 de ori. Când o celulă somatică obișnuită ajunge la data expirării* fie adoarme (o stare numită *senescență*), fie se sinucide (*apoptoză*). Acest fenomen nu înseamnă sfârșitul organului, întrucât celulele stem produc celule de înlocuire de același fel. Însă, în cele din urmă, procesul de înlocuire se uzează la rândul său și întregul corp moare, lăsând progeniturile pe cale germinală (dacă există) să ducă mai departe în viitor moștenirea genetică.

De ce ar vrea o celulă întreagă la minte să aibă o existență pluricelulară care presupune un val scurt de replicare urmat de suicid? Ce avantaj poate dobândi în marele joc al supraviețuirii? Ca întotdeauna în biologie, apar concesii. Devenind parte a unui colectiv de celule asemănătoare din punct de vedere genetic, o celulă oarecare va contribui la propagarea majorității genelor sale prin celulele germinale. Dacă întregul colectiv are funcții de supraviețuire care nu sunt disponibile fiecărei celule în parte, atunci aritmetica moștenirii genetice

---

bacteriile se pot agrega, formând colonii care prezintă uneori fenomene asemănătoare cancerului.

* Când se întâmplă asta? Când niște mici dopuri de la capetele cromozomilor (telomerii) se uzează.

Scanned with OKEN Scanner

poate înclina balanța în favoarea comunității în detrimentul existenței individuale izolate. Când matematica arată bine, se încheie un pact între celulele individuale și organism. Celulele se alătură proiectului colectiv și mor, iar organismul își asumă răspunderea să propage genele celulelor. Pluricelularitatea presupune, așadar, un contract implicit între organism ca întreg și membrii săi celulari. E un contract care a fost semnat pentru prima oară în Proterozoic, în urmă cu un miliard de ani.

Pluricelularitatea poate fi o idee bună (pentru noi funcționează), dar are și un dezavantaj. Când indivizii iau parte la un efort comun, există întotdeauna șansa ca unii să trișeze. E un lucru des întâlnit în societatea noastră, unde oamenii beneficiază de pe urma unui stat organizat sub forma apărării, asistenței sociale și infrastructurii, dar trebuie să plătească aceste lucruri prin intermediul taxelor. Cum știm foarte bine, există marea ispită să trișăm, adică să ne bucurăm de beneficii, dar să evităm taxele. Se întâmplă peste tot în lume. Pentru a contracara această tentație, guvernele au inventat reguli (codul fiscal din Australia, de exemplu, are până la un milion de cuvinte; în Statele Unite e aproape infinit de complex). Respectarea regulilor e asigurată de guvern și de organismele însărcinate cu aplicarea legii. În ciuda acestui aranjament elaborat, sistemul e imperfect; există o cursă a înarmării între evazioniști și oamenii legii: frauda pe internet și furtul identității sunt cele mai bune exemple actuale. O cursă a înarmării asemănătoare se desfășoară și în pluricelularitate. Pentru a face celulele individuale să adere la contract, trebuie să existe mai multe niveluri de control supravegheate de organism ca întreg menite să descurajeze evazioniștii. Astfel, o celulă somatică (epitelială, hepatică, pulmonară etc.) se va divide în mod normal doar când îi permit regulile. Când e nevoie de mai multe celule de tipul respectiv, „programul de replicare" intern al celulei va rezolva problema. Dar dacă diviziunea nu are loc în mod corespunzător, atunci mecanismele regulatoare vor interveni fie

Scanned with OKEN Scanner

pentru a o împiedica, fie (dacă celula continuă să fie recalcitrantă) pentru a aplica pedeapsa capitală: apoptoza. Un exemplu al acestei aplicări a legii apare dacă o celulă se pomeneşte într-un alt fel de ţesut decât ar trebui. De exemplu, dacă o celulă hepatică e transportată accidental (sau transplantată intenţionat) în plămân, soarta ei nu va fi prea fericită. Semnalele chimice din plămân recunosc că au de-a face cu un intrus şi pot impune apoptoza.

Ce înseamnă pentru o celulă să trişeze în cadrul unui organism pluricelular? Înseamnă o revenire la strategia egoistă de tipul „fiecare celulă pentru ea însăşi" întâlnită în viaţa unicelulară: replicare, replicare, replicare. Cu alte cuvinte, proliferare necontrolată: cancer. În termeni simpli, cancerul reprezintă ruperea vechiului contract dintre celulele somatice şi organism şi revenirea la o strategie mai veche şi mai egoistă.

De ce eşuează forţele de menţinere a ordinii? Motivele pot fi multiple. Printre cele evidente se numără vătămările aduse uneia dintre „genele-poliţist" (provocate, de exemplu, de radiaţii sau de o substanţă chimică carcinogenă). Există o clasă de gene, p53 fiind cea mai cunoscută, care acţionează ca inhibitori ai tumorii. Dacă p53 e vătămată, nu mai poate inhiba tumora. Un alt declanşator e imunosupresia. Printre funcţiile sistemului imunitar adaptativ se numără şi supravegherea împotriva cancerului. Dacă sistemul funcţionează corect, primele celule de cancer sunt identificate şi distruse (sau arestate şi ţinute în detenţie) înainte să provoace pagube. Însă celulele canceroase se pot ascunde de ochii poliţiei printr-un proces chimic. Acestea pot submina sistemul imunitar şi dinăuntru, recrutându-i iscoadele (celulele macrofage) şi trecându-le de partea lor, asemenea unor spioni capturaţi pe care îi conving să lucreze pentru ele. Celulele macrofage asociate tumorii vor acoperi astfel tumora, zădărnicind atacul imunitar.

Scanned with OKEN Scanner

Declanşarea cancerului depinde de două lucruri: o celulă normală trebuie să adopte o strategie de trişare şi poliţia organismului trebuie să facă undeva o greşeală. Explicaţia convenţională e teoria mutaţiei somatice, conform căreia vătămările genetice se acumulează în celulele somatice ca urmare a înaintării în vârstă, a radiaţiei sau a substanţelor chimice carcinogene, provocând celulele să-şi schimbe comportamentul şi să dezerteze, adică să-şi urmeze propria agendă. Conform teoriei ortodoxe, „neoplasma" rezultată (sau populaţia de celule noi) dezvoltă rapid caracteristicile distinctive pe care le-am pomenit, inclusiv proliferarea necontrolată, precum şi tendinţa de a se împrăştia prin corp şi de a coloniza organe îndepărtate. Teoria mutaţiei somatice pleacă de la premisa că *aceleaşi* caracteristici ale cancerului sunt reinventate din nou în fiecare gazdă doar printr-un fel de proces darwinian rapid de selecţie naturală, în care cele mai adaptate (adică cele mai agresive) celule canceroase se înmulţesc mai repede decât adversarele lor printr-un proces haotic de replicare, ucigând în cele din urmă gazda (şi pe ele însele). Deşi consacrată, teoria mutaţiei somatice are o putere predictivă foarte mică, întrucât explicaţiile pe care le dă sunt bazate pe un scenariu diferit de la caz la caz şi au logica *Simplelor povestiri* pentru copii ale lui Kipling. Mai grav, nu poate explica felul în care mutaţiile oferă atât de multe îmbunătăţiri ale funcţionării unui singur neoplasm într-un timp atât de scurt (da, din nou asta). De asemenea, e paradoxal că genomurile tot mai vătămate şi defecte îi permit unui neoplasm să capete o funcţionalitate nouă atât de puternică, precum şi atât de multe caracteristici predictibile.

Rădăcinile evolutive ale cancerului

În ultimii ani, eu şi colegii mei am dezvoltat o explicaţie întru câtva diferită a cancerului, care merge până la începuturile sale din trecutul îndepărtat.[31] Am fost frapaţi de faptul că

Scanned with OKEN Scanner

această boală nu inventează aproape niciodată ceva nou. În schimb, nu face decât să preia funcții deja existente ale organismului-gazdă, multe dintre ele rudimentare și străvechi. Proliferarea fără limite, de exemplu, reprezintă o trăsătură fundamentală a organismelor unicelulare de ere întregi. La urma urmei, viața presupune reproducere, iar celulele au avut la dispoziție miliarde de ani în care să învețe cum să se descurce în fața diferitelor amenințări. Metastaza (procesul prin care celulele în mod normal sedentare devin mobile, părăsind tumora pentru a se răspândi în corp) imită ce se întâmplă în etapa timpurie a embriogenezei, când celulele imature de multe ori nu sunt ancorate, ci pleacă în tipare organizate spre anumite destinații; iar predilecția celulelor canceroase de a invada alte organe oglindește îndeaproape activitatea sistemului imunitar în procesul vindecării rănilor. Aceste fapte, pe care oncologii le cunosc foarte bine, alături de modalitatea predictibilă și eficientă în care cancerul trece prin diversele etape ale malignității sale ne-au convins că boala nu e provocată de celule vătămate care gonesc nebunește și aleatoriu, ci o metodă de supraviețuire străveche, bine organizată și eficientă care apare ca reacție la stres.* În opinia noastră, caracteristicile distinctive ale cancerului nu evoluează independent odată cu dezvoltarea neoplasmului (adică nu apar accidental), ci sunt activate în mod deliberat și folosite sistematic în cadrul reacției strategice a neoplasmului.

Pe scurt, cancerul nu reprezintă un *produs* al vătămării, ci o *reacție* sistematică la un mediu vătămător – un mecanism celular de apărare primitiv. Cancerul e metoda prin care o

---

* Aici, la fel ca în cazurile anterioare, „stresul" face referire la un micromediu periculos, precum carcinogeni, radiații sau hipoxie. Opinia larg răspândită potrivit căreia oamenii care se *simt* stresați riscă să se îmbolnăvească de cancer nu are vreo legătură evidentă cu stresul fizic la care mă refer eu aici.

Scanned with OKEN Scanner

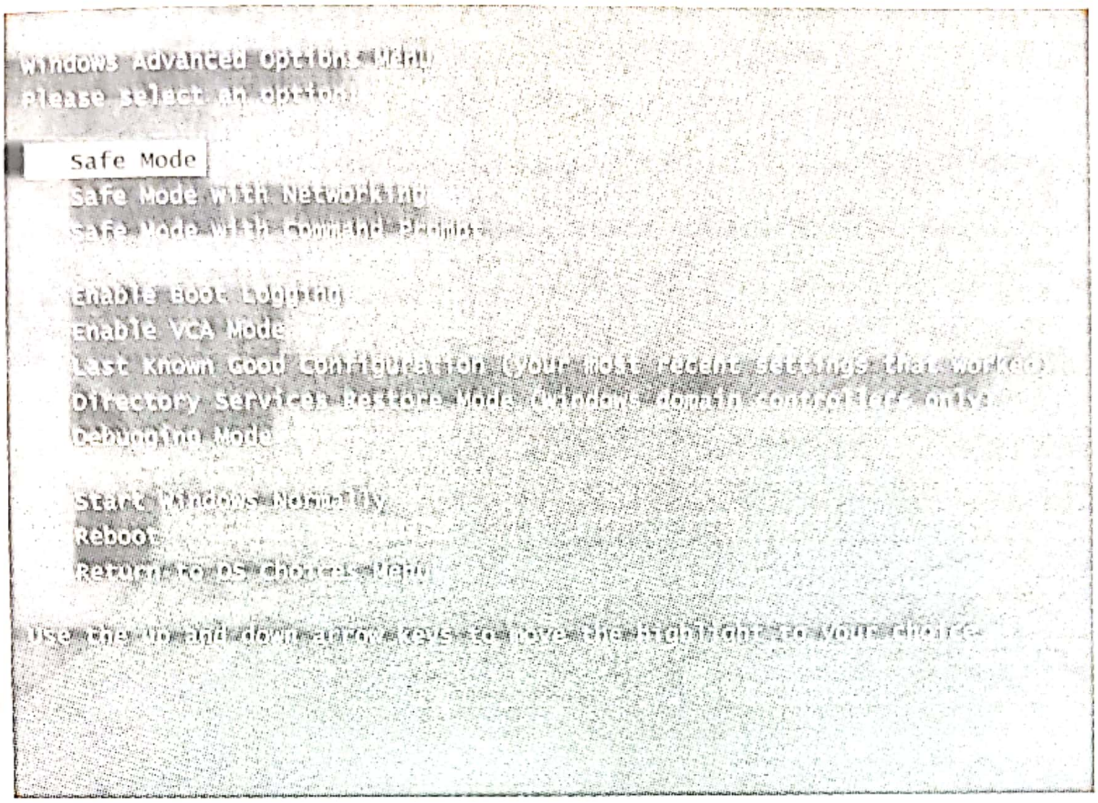


Figura 14 Acest text deprimant poate apărea pe ecranul computerului când apare o problemă la inițializarea sistemului de operare. Astfel, computerul funcționează doar la nivel de bază până când e rezolvată problema. Cancerul ar putea face un lucru asemănător: adică trecerea la funcționalitatea de bază a celulei, care a evoluat în urmă cu mai bine de un miliard de ani, ignorând sau dezactivând sistemele de dată mai recentă.

celulă face față unui loc neprielnic. Poate fi *activat* de mutații, dar, în esență, cauza lui e un instrumentar străvechi și foarte adânc înrădăcinat de proceduri de supraviețuire în caz de urgență.* Diferența esențială dintre cele două teorii poate fi ilustrată printr-o analogie. Să luăm ca exemplu victima unor comportamente agresive la locul de joacă a cărei strategie de supraviețuire e să fugă. Aici, victima e cea care face mișcările

* Distincția dintre declanșator și rădăcină e analogă derulării unui pachet software de bază și frecvent folosit precum Microsoft Word. Comanda „open" declanșează programul Word, dar „cauza" așa-numitului „fenomen Word" e software-ul, ale cărui origini se pierd în negura perioadei de început a industriei computerelor.

Scanned with OKEN Scanner

pentru a fugi; loviturile atacatorilor pot *activa* fuga, dar nu ele sunt *cauza* fundamentală a acestei mişcări: copilul lovit nu e împins la o parte, ci *fuge* de-acolo. Iată o altă analogie. Dacă un computer suferă o vătămare (un program corupt sau o lovitură mecanică), poate iniţializa sistemul de operare în *safe mode* (vezi figura 14). Acesta e un program de bază care îi permite computerului să funcţioneze la cei mai scăzuţi parametri în ciuda vătămării suferite. Tot aşa, cancerul e o stare de bază în care o celulă ameninţată apelează la *propria* funcţionalitate fundamentală, păstrându-şi astfel funcţiile vitale, dintre care proliferarea e cea mai veche, mai vitală şi mai protejată. Pentru a declanşa cancerul, ameninţările nu trebuie să vină sub formă de radiaţii sau substanţe chimice: pot fi ţesuturi îmbătrânite, un nivel scăzut al oxigenului în sânge sau stres mecanic de diferite tipuri, inclusiv răni (sau chiar perturbări electrice – vezi pagina 144). O celulă poate fi provocată să adopte procedura *safe mode* de o mulţime de factori ce pot opera individual sau concomitent.

Deşi unele elemente din programul de bază al cancerului datează chiar de la originea vieţii, unele trăsături mai sofisticate provin din etapele mai târzii ale evoluţiei, mai ales din perioada cuprinsă între 1,5 miliarde şi 600 de milioane de ani în urmă, când au apărut metazoarele primitive. Din punctul nostru de vedere, cancerul e un fel de revenire automată la o formă ancestrală. În limbaj tehnic, e un fenotip *atavic*. Întrucât cancerul e adânc săditîn logica vieţii pluricelulare, mecanismele sale străvechi fiind precis conservate şi bine apărate, lupta împotriva sa se dovedeşte o provocare extrem de dificilă.

Teoria noastră face multe predicţii specifice. De exemplu, ne aşteptăm ca genele implicate cauzal în declanşarea cancerului (numite în general oncogene) să fie asemănătoare din punct de vedere al vârstei cu apariţia pluricelularităţii. Există vreo dovadă în acest sens? Da, există. Putem estima vârsta genelor din datele lor de secvenţă comparând numărul de

Scanned with OKEN Scanner

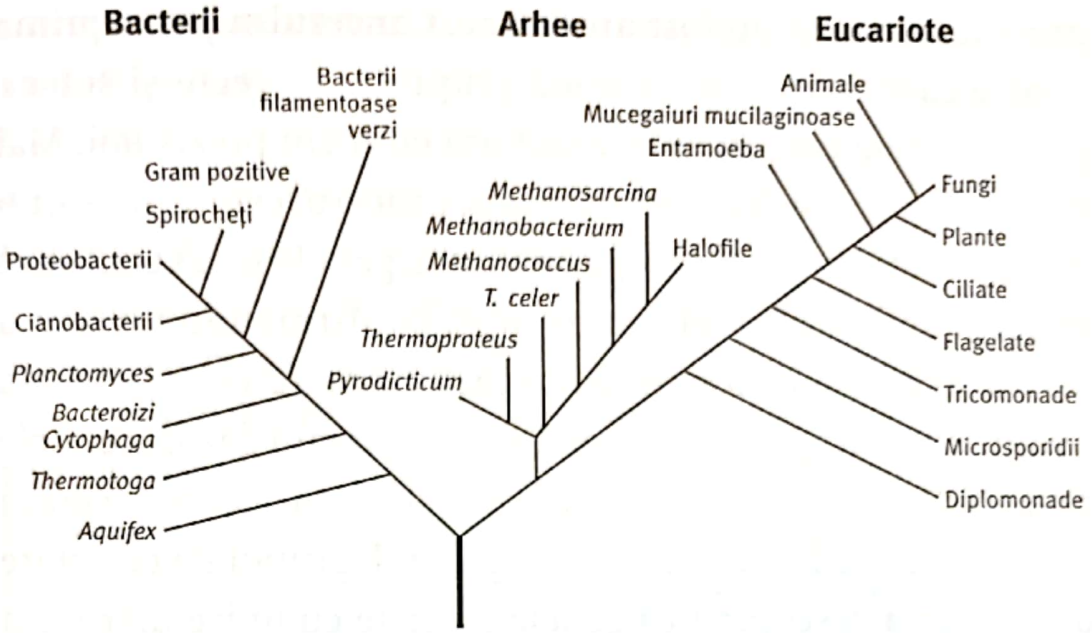


Figura 15 Identificarea istoriei în arborele vieții. De când Darwin a schițat un arbore pentru a reprezenta divergența speciilor în timp, biologii au încercat să reconstruiască istoria vieții folosind registrul fosil. Acum este utilizată și o metodă numită filostratigrafie, care face apel la secvențele genelor mai multor specii pentru a determina strămoși comuni în trecutul îndepărtat. Arborele de mai sus arată cele trei mari domenii ale vieții care se ramifică dintr-o veche origine comună. Lungimile liniilor indică distanța genetică. Ultimul strămoș comun al acestui arbore a trăit în urmă cu aproximativ 3,5 miliarde de ani.

diferențe dintre mai multe specii. Această tehnică fiabilă (numită filostratigrafie) le permite oamenilor de știință să reconstruiască arborele vieții, pornind de la trăsăturile comune de azi pentru a deduce punctul de convergență din trecut (vezi figura 15).

Un studiu din Germania bazat pe patru seturi de date de la gene canceroase diferite a demonstrat o prezență accentuată a genelor care au apărut odată cu evoluția metazoarelor.[32] O analiză recentă a șapte tipuri de tumori condusă de David Goode și Anna Trigos, la Melbourne, în Australia, s-a concentrat asupra expresiei genice.[33] Aceștia au sortat genele în 16 grupuri în funcție de vârstă și apoi au comparat nivelurile de expresie în țesuturile canceroase și normale pentru fiecare

Scanned with OKEN Scanner

grup. Rezultatele au fost uimitoare. Cancerul supra-exprimă genele care aparţin celor două grupuri mai vechi şi sub-exprimă genele mai recente, exact aşa cum am prezis noi. Mai mult, s-a descoperit că, pe măsură ce cancerul evoluează într-o etapă mai agresivă şi mai periculoasă, genele mai vechi sunt exprimate la un nivel mai ridicat, confirmându-ne teoria conform căreia cancerul inversează cu mare viteză săgeata evoluţiei în timp ce se dezvoltă în organismul-gazdă, celulele revenind la formele lor primitive ancestrale în decurs de câteva săptămâni sau luni. În sens mai general, grupul de cercetare australian a descoperit că genele asociate cu unicelularitatea sunt mai active în cancer decât cele care au evoluat mai târziu, în era pluricelularităţii.

La Universitatea de Stat din Arizona, am studiat *ratele* de mutaţie.[34] Teoria atavistă prezice că toate genele mai vechi ar trebui să sufere mai puţine mutaţii în timpul cancerului (la urma urmei, ele sunt răspunzătoare de rularea programului *safe mode*), în vreme ce celulele mai recente ar trebui să sufere mai multe mutaţii. Colegii mei Kimberly Bussey şi Luis Cisneros au lucrat cu un total de 19.756 de gene umane şi au folosit o bază de celule canceroase numită COSMIC, compilată de UK Sanger Institute. Aceste informaţii au fost combinate cu o bază de date de secvenţe genetice de la aproximativ 18.000 de specii din toate grupurile taxonomice, care include şi o analiză a vârstelor evolutive. Astfel, colegii mei au putut să estimeze vârsta evolutivă a genelor din genomul uman. Aceştia au descoperit că genele mai recente de 500 de milioane de ani sunt, într-adevăr, mai predispuse la mutaţie (atât în ţesuturi normale, cât mai ales în cele canceroase), în vreme ce genele mai vechi de un miliard de ani tind să sufere mai puţine mutaţii decât media, aşa cum ne aşteptam. Ei au confirmat şi concluzia studiului german, potrivit căreia vârsta genelor

Scanned with OKEN Scanner

canceroase* se concentrează în preajma începutului pluricelularității, sprijinind astfel teoria conform căreia cancerul e stimulat de perturbarea funcțiilor care au evoluat pentru a asigura organizarea pluricelulară. COSMIC clasifică genele în două categorii, dominante și recesive, iar colegii mei au descoperit că genele canceroase care suferă mutații recesive sunt mult mai mai vechi decât majoritatea genelor umane.

Rezultatul cel mai grăitor a venit din abordarea unei chestiuni relativ diferite: la ce sunt bune celulele canceroase? O bază de date numită DAVID organizează genele pe baza funcționalității lor. Când Cisneros și Bussey au introdus date din COSMIC în DAVID, rezultatul a fost că genele canceroase recesive mai vechi de 950 de milioane de ani aveau accentuate două funcții fundamentale: controlul ciclului celular și repararea daunelor genetice de tip dublu-catenar (cele mai grave vătămări pe care le poate suferi ADN-ul). Privind istoria evolutivă a genelor implicate, cercetătorii au observat ceva important. Genele care nu au suferit mutații, aflate în aceleași căi de reparare a ADN-ului, corespund** acelor gene din *bacterii* care stimulează reacția de mutație adaptativă la stres – exact fenomenul pe care l-am discutat anterior (vezi pagina 157). Și, la fel ca în cazul bacteriilor, genele ajută la creșterea ratei de mutație a celulei în efortul disperat de a supraviețui prin construirea unei căi prin care să scape din pericol. Am explicat deja situația (descoperită de Susana Rosenberg) în care bacteria, când simte o ruptură dublu-catenară, poate recurge la un mecanism de reparare stângaci, creând astfel o serie de erori (mutații) de ambele părți ale rupturii. Voiam să aflăm dacă celulele canceroase prezintă la rândul lor semne de vătămare în zona reparațiilor dublu-catenare. Se pare că da. Din 764 de

---

* Definite în acest studiu drept genele despre care s-a demonstrat că sunt implicate cauzal în apariția cancerului.

** În limbaj tehnic, sunt numite „ortologi" ai acelor gene.

Scanned with OKEN Scanner

mostre de tumori prelevate din șapte zone diferite (pancreas, prostată, os, ovar, piele, sânge și creier) pe care le-au studiat colegii mei, 668 prezentau semne de aglomerare mutațională în jurul rupturii. Toate acestea s-au potrivit cu teoria noastră conform căreia celulele supuse stresului devin canceroase prin redeșteptarea rețelelor de gene ancestrale care, printre alte lucruri, cresc rata mutațiilor. Astfel, una dintre cele mai cunoscute caracteristici ale cancerului (și motivul principal pentru care scapă de chimioterapie prin dezvoltarea unei varianțe rezistente la medicamente) se dovedește a fi autoprovocată. Această descoperire se potrivește bine cu teoria atavistă: cancerul nu e decât însușirea unei vechi reacții la stres care a evoluat cu mult timp în urmă în epoca vieții unicelulare și care e încă folosită de bacteriile actuale.

La fel ca în cazul bacteriilor supuse stresului, mutațiile din celulele canceroase sunt departe de a fi aleatorii: există „zone fierbinți" și „zone reci" clare (regiuni unde mutația e mai intensă și, respectiv, mai slabă). E cât se poate de logic. Organismele pluricelulare ar trebui să se străduiască din greu să-și protejeze părți esențiale ale propriului genom, cum sunt cele răspunzătoare de funcțiile fundamentale ale celulei, și să aloce mai puține resurse regiunilor asociate cu trăsăturile mai puțin importante dezvoltate mai recent. Într-un proiect condus de Robert Austin și Amy Wu, de la Universitatea Princeton, celulele canceroase au fost supuse unei toxine terapeutice (doxorubicină) și li s-a studiat evoluția rezistenței la medicament. Austin și Wu au descoperit că genele din „zonele reci" erau mult mai vechi decât media.[35] Noile rezultate ne ajută să explicăm motivul pentru care selecția naturală nu a eliminat năpasta cancerului. Dacă tumorile sunt, de fapt, o revenire la o formă ancestrală, atunci ne putem aștepta ca vechile trasee și mecanisme care stimulează cancerul să se numere printre cele mai bine conservate și protejate, întrucât îndeplinesc un rol fundamental în funcționarea vieții. Nu pot fi eliminate fără a

Scanned with OKEN Scanner

provoca un dezastru celulelor cu pricina. Genele care declanşează mutaţia investigate de noi sunt doar un exemplu.

Un alt motiv pentru care evoluţia nu a eliminat cancerul e constituit de legătura cu embriogeneza. Se ştie de trei decenii că unii oncogeni joacă un rol crucial în dezvoltare, iar eliminarea lor ar fi catastrofală. În mod normal, aceste gene de dezvoltare sunt reduse la tăcere în forma adultă, dar dacă sunt trezite din nou apare cancerul (un embrion dereglat care se dezvoltă într-un ţesut adult). Scriitorul George Johnson rezumă bine această idee, numind tumorile „geamănul malefic al embrionului".[36] E semnificativ faptul că etapele timpurii ale embrionului sunt în perioada în care e conceput planul de bază al corpului organismului, reprezentând cea mai timpurie fază a vieţii pluricelulare. Când e acţionat comutatorul cancerului, vor avea loc tulburări sistematice la nivelul regulatorilor genetici şi epigenetici ai fluxului de informaţie, în măsura în care celulele recapitulează circumstanţele foarte diferite ale dezvoltării embrionare timpurii. Acest lucru va produce schimbări ale felului în care genele regulatoare sunt raportate unele la altele, dar şi schimbări ale tiparelor de expresie a genelor. Grupul nostru de cercetare încearcă să găsească semnăturile informaţionale ale acestor schimbări. Sperăm ca acest lucru va dovedi posibilă identificarea „caracteristicilor informaţionale" distincte ale cancerului, alături de cele fizice pe care le-am pomenit deja: practic un indicator software al etapei incipiente a cancerului care să preceadă schimbările observabile clinic de la nivelul morfologiei celulelor şi ţesuturilor şi să tragă din timp un semnal de alarmă.

Teoria atavistă a cancerului are implicaţii importante nu doar pentru diagnostic, ci şi pentru terapie. Credem că misiunea de a găsi un „leac" pentru cancer e o distragere costisitoare; cancerul, fiind atât de profund înrădăcinat în însăşi natura vieţii pluricelulare, e cel mai bine gestionat şi controlat (nu eliminat) prin confruntarea lui cu anumite condiţii potrivnice

Scanned with OKEN Scanner

stilului său de viață atavic. Șansele de supraviețuire în lupta cu această boală ucigătoare vor crește numai înțelegând complet locul ocupat de cancer în contextul general al istoriei evoluției vieții.

Scanned with OKEN Scanner

5. VIAȚA FANTOMATICĂ ȘI DEMONII CUANTICI

Se spune deseori că, oricât de ingenioase ar fi invențiile omenirii, natura ne-o ia invariabil înainte. E fără îndoială adevărat că biologia a descoperit roți și pompe, foarfece și clicheți cu mult înaintea noastră. Dar asta nu e tot. Natura a descoperit și procesarea informației digitale cu miliarde de ani înainte ca oamenii să inventeze computerul. Astăzi ne aflăm în pragul unei noi revoluții tehnologice ce promite să aducă schimbări la fel de uimitoare ca acelea care au avut loc după apariția computerului. Mă refer acum la mult râvnitul computer cuantic.

Ideea esențială a fost surprinsă de Richard Feynman într-o prelegere numită „Simularea fizicii cu ajutorul computerelor", susținută la Universitatea din California, Berkeley, în 1982.[1] Feynman a arătat că, atunci când sunt folosite pentru a modela obiecte mecanice fundamental cuantice cum sunt moleculele, computerele convenționale întâmpină probleme la nivelul resurselor computaționale necesare pentru a ține cont de tot. În opinia sa însă, un (pe atunci ipotetic) computer cuantic s-ar putea ridica la înălțimea provocării pentru că ar simula ceva înrudit cu el. În 1985, fizicianul David Deutsch de la Oxford a dus ideea și mai departe, găsind exact regulile prin care informația poate fi înscrisă în stările sistemelor atomice și subatomice pentru a fi apoi manipulată folosind legile standard ale mecanicii cuantice.

Scanned with OKEN Scanner

Secretul din spatele unui computer cuantic e *superpoziția*. Într-un computer convențional (clasic), un comutator e pornit sau oprit, lucru care poate fi reprezentat prin 1 sau 0. Într-un computer cuantic, comutatorul poate fi în *ambele* stări, astfel încât poate reprezenta 1 și 0 în același timp: o superpoziție a lui 1 și 0. Superpoziția nu e doar un amestec de tip jumi-juma al celor două numere, ci toate amestecurile posibile. Fizicienii numesc această entitate *qubit* (de la *quantum bit*). Dacă legăm câteva zeci de qubiți, putem, teoretic, crea un aparat care să surclaseze din punctul de vedere al performanței cel mai bun computer convențional.

N-a durat mult și fizicienii au început să-și propună construirea unui astfel de aparat, iar astăzi cursa pentru dezvoltarea și comercializarea unui computer cuantic complet funcțional a devenit obiectivul principal al unor industrii de miliarde de dolari ce implică importante programe guvernamentale și comerciale la nivel mondial. Investiția uriașă se datorează puterii de calcul pe care o poate dezlănțui un computer cuantic. Nu doar că ar putea simula procese atomice și moleculare în cele mai mici detalii, ci ar putea chiar sparge codurile folosite în comunicații pentru criptare și ar putea sorta prin baze de date uriașe cu viteza fulgerătoare. Dacă aceste computere ar ajunge un bun de larg consum, securitatea computerelor convenționale ar deveni o glumă: un computer cuantic ar pune în pericol serviciile secrete, comunicațiile diplomatice, tranzacțiile bancare, cumpărăturile pe internet – de fapt, orice informație confidențială din mediul online care necesită criptare.

Dar ce legătură are calculul cuantic cu viața? Ei bine, biologia presupune gestionarea informației. Cum viața se descurcă atât de bine să manipuleze biți, e oare posibil să fi învățat să manevreze și qubiții? S-au făcut mai multe afirmații de genul acesta. Cu toate că există foarte puține dovezi că organismele se dedică calculelor cuantice, devine tot mai limpede faptul că viața chiar exploatează unele efecte cuantice.

Scanned with OKEN Scanner

Teoria cuantică e extrem de stranie

Einstein a spus la un moment dat că efectele cuantice sunt „fantomatice". De fapt, credea că sunt atât de stranii, încât a susținut cu tărie că mecanica cuantică oferă o perspectivă greșită asupra naturii. Această ipoteză părea să se afle în conflict cu îndrăgita sa teorie a relativității, permițând existența efectelor cu viteză mai mare decât cea a luminii,* iar ideea că incertitudinea și indeterminismul se situează la baza fenomenelor fundamentale i se părea nefundamentată. Astăzi, foarte puțini fizicieni i-ar lua partea lui Einstein. Mecanica cuantică, așa ciudată cum e, a pătruns în domeniul general al fizicii. La urma urmei, iată o teorie care nu doar explică aproape totul, de la particule subatomice la stele, ci ne-a oferit tehnologii indispensabile, cum ar fi laserul, tranzistorul și superconductorul. Problema nu e puterea extraordinară a mecanicii cuantice de a explica lumea și a impulsiona creșterea industriilor secolului XXI, ci implicațiile sale extrem de stranii pentru natura realității.

Să ne închipuim următoarele scenarii:

Aruncăm o minge de tenis într-un geam și ea ricoșează. O aruncăm din nou, la fel ca mai devreme, doar că de data aceasta mingea trece de partea cealaltă a geamului fără să-l spargă.

Lovim o bilă de biliard și o trimitem drept spre un buzunar. Când ajunge la marginea acestuia, în loc să cadă înăuntru ricoșează înapoi, de parcă s-ar fi lovit de un zid invizibil.

O minge se rostogolește printr-un șanț de lângă drum spre o intersecție. Când ajunge acolo, virează singură, fără să fie lovită cu piciorul.

Toate aceste întâmplări ar putea fi considerate miraculoase dacă s-ar întâmpla în viața de zi cu zi, dar ele se întâmplă tot

---

* Acum știm că mecanica cuantică nu permite comunicarea cu o viteză mai mare decât cea a luminii, anulând astfel obiecția lui Einstein.

Scanned with OKEN Scanner

timpul la nivel atomic şi molecular, tărâmul fizicii cuantice. Alte fenomene cuantice stranii care nu au corespondent cotidian sunt aparenta existenţă simultană în două locuri a unor particule precum electronii,* doi fotoni aflaţi la o distanţă de câţiva metri care îşi coordonează activităţile (ceva ce Einstein a numit „acţiune fantomatică la distanţă") şi o moleculă care se învârte în sens orar şi antiorar în acelaşi timp. S-au scris cărţi întregi despre aceste fenomene neobişnuite, dar reale. Aici mă interesează o singură întrebare: fenomenele cuantice fantomatice se petrec şi în biologie?

Într-un fel, toată biologia e cuantică. Viaţa e, până la urmă, chimie aplicată, iar formele, dimensiunile şi interacţiunile moleculelor nu pot fi explicate fără apelul la mecanica cuantică. Dar nu la asta se gândesc oamenii când vorbesc despre „biologie cuantică". Ce vrem să aflăm, de fapt, e dacă procesele cuantice *non-triviale*, precum tunelarea (de genul mingii care trece prin geam) sau aşa-numita corelare cuantică (acţiunea fantomatică la distanţă), joacă un rol important în viaţă.

CASETA 11: E O UNDĂ? E O PARTICULĂ? NU, E O CUANTĂ!

Una dintre descoperirile fundamentale ale fizicii cuantice e aceea că undele se pot comporta uneori asemenea particulelor. Einstein a fost primul care a sugerat acest lucru, în 1905, cu ipoteza sa conform căreia lumina, cunoscută drept undă, schimbă energie doar prin pachete discrete numite fotoni. În schimb, electronii, pe care în mod normal îi considerăm particule, se comportă uneori asemenea undelor (la fel ca toate particulele de materie). Schrödinger e cel care a formulat ecuaţia ce descrie cum se comportă undele de materie. Multe efecte cuantice surprinzătoare, asemănătoare scenariilor de mai sus,

* Trebuie să interpretăm cu grijă această descriere atât de frecvent repetată. Electronul nu se bifurcă de-a dreptul. Orice experiment care va încerca să-i determine poziţia exactă îl va găsi mereu într-un loc *sau* în altul. Dar, în absenţa unei astfel de măsurători, există, fără îndoială, efecte fizice clare ce decurg din poziţia lui nedeterminată.

Scanned with OKEN Scanner

sunt consecințe ale naturii de undă a materiei. E zadarnic să dezbatem dacă un foton sau un electron sunt „de fapt" o undă sau o particulă. Putem efectua experimente în care se manifestă ambele aspecte pe rând, niciodată în același timp. Nu putem decât să acceptăm că locuitorii microlumii nu au corespondent în viața de zi cu zi.

Felul în care undele cuantice se răspândesc și se unesc le afectează însemnătatea fizică. Închipuiți-vă că aruncați simultan două pietre într-un iaz cu suprafața liniștită, păstrând o distanță de câteva zeci de centimetri între ele. Undele provocate de fiecare piatră se răspândesc și se suprapun. Dacă creasta undei unei pietre întâlnește creasta undei celeilalte pietre, cele două creste contribuie la formarea unei creste superioare. Dacă o creastă întâlnește o bază, acestea se anulează reciproc. Tiparul încrucișat care rezultă, în caz că nimic nu deranjează undele, se numește *coerent*. Dar acum să presupunem că o ploaie cu grindină se abate asupra iazului și creează unde haotice. Tiparul ordonat al pietrelor va fi tulburat. Fenomenul se numește *decoerență*. Ajungând la undele cuantice de materie, multe efecte cuantice stranii provin din coerența undelor. Dacă aceasta dispare, dispar și multe efecte cuantice non-triviale. Asemenea undelor de apă, cele de electroni vor intra în decoerență dacă sunt deranjate. Electronii din materia vie nu suferă de pe urma ploilor cu grindină, dar trebuie să facă față furtunilor moleculare, cum ar fi neîncetatul bombardament termic lansat de moleculele de apă. Niște calcule rapide sugerează faptul că decoerența va avea loc extrem de repede în majoritatea condițiilor biologice. Însă par să existe și metode de ocolire care, în circumstanțe speciale, permit existența unor rate de decoerență anormal de mici.

De regulă, dacă există vreun lucru care dă vieții un avantaj cât de mic, atunci selecția naturală îl va exploata. Dacă „ceva cuantic" îi poate permite vieții să se desfășoare mai repede, mai ieftin și mai bine, ne putem aștepta că evoluția îl va descoperi și îl va favoriza. Însă acest raționament superficial ne face imediat să ne împotmolim. Efectele cuantice reprezintă o formă subtilă și delicată de ordine atomică și moleculară. Inamicul tuturor efectelor cuantice e *dezordinea*. Dar viața e plină de dezordine! Zgomotul moleculelor care se agită haotic,

Scanned with OKEN Scanner

atacurile necontenite îndreptate împotriva celei de-a doua legi a termodinamicii... entropie, entropie peste tot! Efectele cuantice non-triviale pot supraviețui în fața acestui zgomot termic inexorabil numai în circumstanțe foarte neobișnuite. Intrați în orice laborator care studiază fenomene cuantice. Veți vedea camere de oțel strălucitoare, aparate care licăresc, criostate care zumzăie, nenumărate fire și țevi, fascicule laser minuțios aliniate, computere, o sumedenie de echipamente scumpe de înaltă precizie și atent calibrate. Scopul lor principal e să reducă tulburările provocate de agitația termică fie prin ecranare totală (izolarea sistemului cuantic de mediul înconjurător), fie prin răcirea tuturor elementelor relevante aproape de zero absolut (aproximativ –273°C). O parte consistentă din averea investită în industria computerelor cuantice se duce către combaterea amenințării mereu prezente a tulburărilor termice. E un efort extrem de mare.

Dată fiind munca extraordinară pe care trebuie s-o depună fizicienii pentru a evita efectele zgomotului termic, pare incredibil că în lumea dezordonată și cu temperatură relativ ridicată a organismelor biologice s-ar putea întâmpla ceva atât de straniu. O proteină dintr-o celulă e cât se poate de departe de un sistem cu temperatură scăzută. Dar nu uitați de demon. A fost conceput de Maxwell tocmai pentru a produce ordine din haos, pentru a încălca a doua lege, pentru a evita efectul coroziv al entropiei. Deși știm că nici măcar un demon nu poate încălca litera celei de-a doua legi, poate fără îndoială să-i încalce spiritul. Viața e, de fapt, plină de demoni. Oare printre trucurile ingenioase ale demonilor vieții se află și capacitatea de a jongla nu doar cu biți, ci și cu qubiți, dând dovadă de o dexteritate până acum neegalată de cele mai moderne laboratoare ale noastre?

Scanned with OKEN Scanner

Tunelarea

Stuart Lindsay, care îmi e coleg la ASU, este specialist în biologie cuantică. Lindsay cercetează în principal felul în care electronii circulă prin molecule organice, mai ales A, C, G și T din ADN. Metoda perfecționată în laboratorul său presupune desfacerea ADN-ului în catene individuale și aspirarea uneia dintre ele (la fel cum am face cu o spaghetă) printr-un orificiu minuscul, un „nanopor", dintr-o placă. De-a curmezișul orificiului sunt așezați doi electrozi mici. Pe măsură ce fiecare „literă" trece prin orificiu, electronii trec prin ea, creând un mic curent electric. Din fericire, se pare că puterea și caracteristicile curentului diferă pentru fiecare literă, prin urmare aranjamentul lui Lindsay poate fi folosit și ca un aparat de secvențiere la mare viteză. Acesta a descoperit și că aminoacizii pot fi conductori buni ai curentului electric, ceea ce a deschis posibilitatea de a secvenția proteinele în mod direct.

Când Lindsay și-a descris prima oară cercetarea, recunosc că am fost nedumerit de ce moleculele organice ar conduce electricitate. Până la urmă, folosim substanțe organice precum cauciucul și plasticul în scop de izolare, sub formă de *barieră* în calea electricității. De fapt, la prima vedere e greu de înțeles cum și-ar croi electronii drum prin, să zicem, o nucleotidă sau un aminoacid. Se dovedește că explicația ține de un fenomen cuantic ciudat numit „tunelare" (de tipul „mingii prin geam" la care m-am referit anterior). Electronii pot traversa o barieră chiar și atunci când nu au suficientă energie s-o depășească. Dacă materia n-ar avea natură de undă (vezi caseta 11), electronii ar ricoșa pur și simplu la întâlnirea cu molecula organică. Efectul de tunel a fost anticipat când Schrödinger și-a prezentat faimoasa ecuație pentru undele de materie în anii '20, iar exemplele au fost găsite la scurt timp după aceea. Un tip de radioactivitate numit descompunere alfa, observată pentru prima oară în anii 1890, ar fi de neînțeles dacă n-am ști că

Scanned with OKEN Scanner

particulele alfa emise își fac un tunel prin bariera de forță nucleară a uraniului și a altor substanțe radioactive. Tunelarea electronilor constituie baza multor aplicații comerciale din electronică și știința materialelor, inclusiv importantul microscop cu scanare prin tunelare cu electroni.

Stuart Lindsay poate trimite electroni prin molecule organice, dar e natura capabilă de același lucru? Sigur că da. Există o clasă de molecule numite metalo-proteine – practic proteine cu un atom de metal, precum fierul, îngropat în adâncul lor (un exemplu cunoscut e hemoglobina). Metalele sunt conductori buni, ceea ce constituie un avantaj. Însă fenomenul tunelării prin molecule organice e destul de răspândit de fapt, ceea ce ne face să ne întrebăm: de ce ar vrea electronii să traverse proteine? Un motiv bun ar fi metabolismul. Enzimele implicate în oxigenare și în sintetizarea atât de importantelor molecule ATP de energie se bazează pe transportarea rapidă a electronilor. Tunelarea precisă a electronilor ajută viața să ungă roțile mecanismului de generare a energiei. Nu e doar o coincidență fericită: aceste molecule organice au fost dezvoltate prin evoluție. Nu e bună oricare aglomerare de molecule organice, cel puțin asta spun Harry Gray și Jay Winkler, de la Beckman Institute, Caltech: „Trebuie îndeplinite o serie de cerințe tehnice foarte stricte pentru a transporta sarcini în mod rapid și eficient de-a lungul anumitor trasee specifice și pentru a împiedica difuzia greșită [...] și perturbarea fluxului de energie".[2]

Toate acestea sunt realități fizice foarte interesante, dar există o întrebare mai importantă și mai fascinantă. Oare biomoleculele au fost favorizate în general de evoluție pentru o „tunelabilitate" cuantică mai eficientă? Un studiu recent efectuat de Gábor Vattay de la Universitatea Eötvös Loránd din Ungaria și de colaboratorii săi sugerează că „planul cuantic" ar putea să nu fie limitat la metabolism, ci reprezintă o trăsătură generică a biologiei.[3] Au ajuns la această concluzie cercetând

Scanned with OKEN Scanner

unde în spectrul dintre conductorii electrici și materialele izolante se află moleculele biologice esențiale. Cercetătorii susțin că au identificat o nouă clasă de conductori care ocupă punctul critic de tranziție dintre materialele care se comportă asemenea unor izolatori și metale. Se pare că multe biomolecule importante intră în această categorie: testosteron, progesteron, zaharoză, vitamina D3 și cofeina se numără printre exemplele date de Vattay *et al.* De fapt, ei cred că „majoritatea moleculelor care iau parte activ la procesele biochimice sunt sintonizate exact cu punctul de tranziție și sunt conductori critici".[4] Probabil că această stare aflată la limita capacității conductoare reprezintă o proprietate destul de rară printre molecule și, dat fiind numărul astronomic de molecule care se pot forma din elementele fundamentale folosite de viață, șansele de a nimeri un aranjament care oferă o asemenea conductibilitate critică sunt infinitezimale. Prin urmare, ele trebuie să fie rezultatul unor uriașe presiuni evolutive. Cel puțin în cazul de față, biologia chiar a identificat un avantaj cuantic și l-a adoptat.

Dansul echilibrat

Biologia cuantică a rămas în umbră până în 2007, când o descoperire crucială a aruncat lumină asupra sa (la propriu) și a atras atenția restului cercetătorilor. Un grup de oameni de știință de la Universitatea din Chicago, sub conducerea lui Greg Engel, investigau procesele fizice din spatele fotosintezei.[5] Ați putea spune că fotosinteza e prin definiție un fenomen cuantic, având în vedere că implică fotoni. Însă asta nu face decât s-o includă în categoria efectelor cuantice „triviale". Organismul (fie el plantă sau bacterie fotosintetică) folosește lumina pentru a crea biomasă din dioxid de carbon și apă. În acest sens, fotonul e doar o sursă de energie, aspectul său cuantic fiind doar accidental. Lucrurile stranii încep la pasul următor.

Scanned with OKEN Scanner

Complexul molecular care capturează fotonul și centrul de reacție în care se desfășoară, de fapt, procesele chimice nu sunt aceleași. E mai degrabă ca și cum am avea panouri solare pe un câmp pentru a asigura energia unei fabrici aflate mai încolo pe drum. În biologie există întotdeauna o competiție pentru energie, așa că e avantajos să se evite irosirea acestei resurse valoroase atunci când e transportată din loc în loc, în cazul de față de la moleculele care captează lumina către centrul de reacție. Specialiștii au fost multă vreme nedumeriți de felul în care fotosinteza poate realiza un transfer atât de eficient. Acum se pare că efectele cuantice non-triviale ne pot da primele răspunsuri.

Pentru a explica ce se întâmplă trebuie să aduc în discuție o altă proprietate cuantică stranie pe care am pomenit-o deja în trecere: capacitatea particulelor cuantice de a fi „în două locuri în același timp". De fapt, pot fi în multe locuri în același timp. Un corolar al acestei afirmații e că, în drumul de la punctul A la punctul B, o particulă poate merge pe mai multe trasee în același timp. Mai exact, se deplasează *pe toate traseele posibile*, nu doar pe cel mai scurt (vezi figura 16). Ciudatul calcul al mecanicii cuantice presupune integrarea *tuturor* căilor disponibile care duc de la punctul de plecare la cel de sosire: toate contribuie la stabilirea felului în care particula ajunge la destinație. Sună foarte misterios, dar, de fapt, nu e așa dacă privim particula drept o undă ce se răspândește în exterior, și nu drept un punct mic. Gândiți-vă la o undă de pe suprafața apei care întâlnește o bornă. Undele formează curbe în jurul ei, unele mergând în stânga, altele în dreapta, apoi se întâlnesc de cealaltă parte. Undele cuantice fac la fel. Imaginația ne e depășită, însă, când încercăm să ne gândim în termeni de particule: cum poate o *singură* particulă să fie peste tot în același timp? Cum putem concepe așa ceva? O interpretare populară ne cere să ne gândim (în exemplul de față) la fiecare traseu de la A la B ca reprezentând o lume separată. Dacă există un obstacol în

Scanned with OKEN Scanner

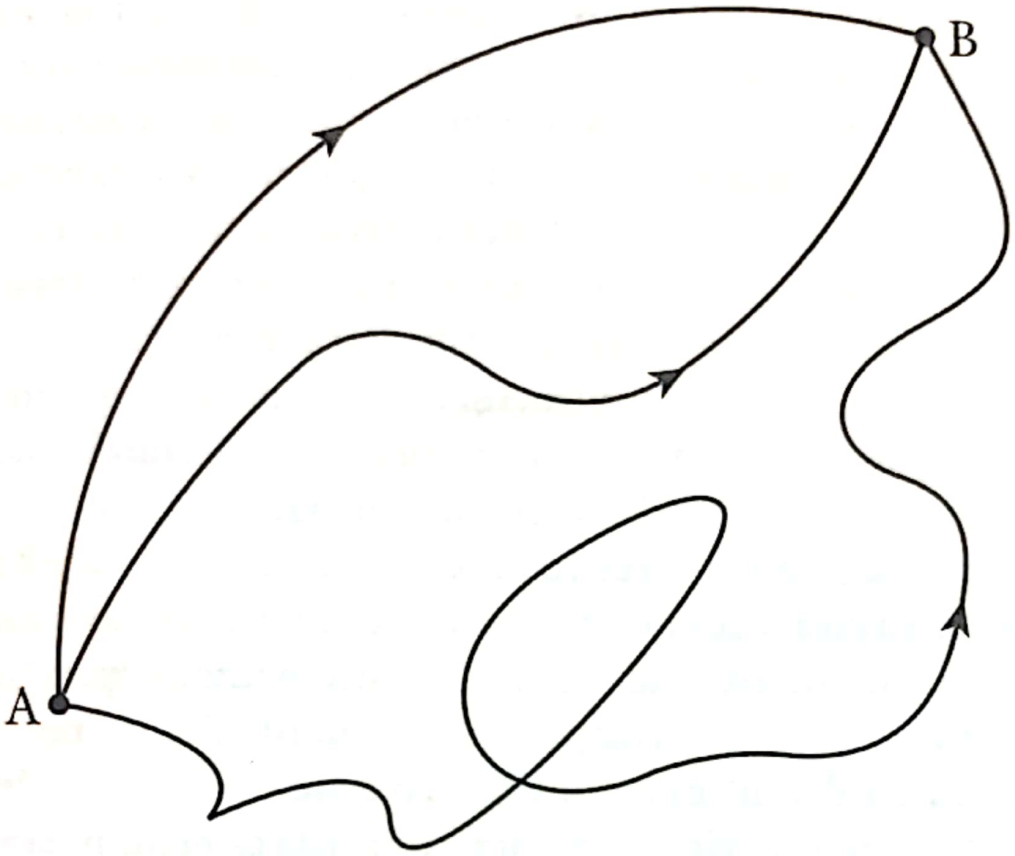


Figura 16 Trasee cuantice. În viața obișnuită, dacă o particulă (de exemplu, o minge de crichet) străbate drumul de la punctul A la punctul B, va urma un traseu definit în spațiu. Nu același lucru e valabil pentru atomi și particulele subatomice. Conform legilor stranii ale mecanicii cuantice, o particulă străbate *toate traseele posibile* între A și B într-un amalgam fantomatic. Fiecare traseu contribuie la proprietățile particulei și chiar are un efect real.

calea particulei (echivalentul bornei din apă), ei bine, în unele lumi, particula va coti la dreapta, iar în altele, la stânga.

Dar ne vom întreba apoi „în ce direcție s-a dus de fapt?" Răspunsul depinde de ce înțelegem prin „de fapt", iar aici discuțiile despre mecanica cuantică devin tulburi și multă lume se pierde. Cu toate astea, mă voi strădui să explic ce se petrece. Conform vechii abordări (folosită cu decenii în urmă), aceste lumi alternative (fiecare conținând o singură traiectorie a particulei) erau considerate doar *pretendenți* la realitate, lumi virtuale fantomatice care „de fapt nu există", dar împreună formează un amalgam (o superpoziție) din care emerge experiența „lumii

Scanned with OKEN Scanner

reale". Mai precis: gândiți-vă că un experimentator trimite un electron dintr-un punct A bine definit și îl detectează într-un punct B bine definit. Ei bine, conform mecanicii cuantice, e imposibil să spunem *cum* a ajuns de la punctul A la punctul B. Nu există nici un lucru evident cu privire la traseul ales. Nu doar că e îi este imposibil experimentatorului să afle traseul, dar nici măcar *natura* nu-l cunoaște. Dacă încercați să amplasați un detector undeva între A și B ca să aruncați o privire în timpul parcurgerii traseului, întregul rezultat e schimbat complet. Fizicianul John Wheeler, o sursă inepuizabilă de descrieri vii, spunea că propagarea cuantică (între punctele A și B, în descrierea mea) e „ca un dragon mare de fum". Are „colți ascuțiți" și „o coadă ascuțită" (la A și la B, acolo unde experimentatorul primește informații riguros definite despre poziția particulei), dar între ele e învăluit în fum.

Astăzi, mulți fizicieni importanți insistă că nenumăratele lumi cuantice ar fi lumi *reale*, că există în paralel, un punct de vedere cunoscut sub numele de interpretare multiple-lumi sau multiple-universuri a mecanicii cuantice. Cât privește motivul pentru care noi experimentăm o singură lume, trebuie să ne întrebăm ce înțelegem prin „noi". Să presupunem că fiecare lume conține o versiune distinctă a ta. Fiecare versiune a ta vede o singură lume. În cazul de față, nu contează dacă ești de acord cu această interpretare la modă, dar extravagantă, a mecanicii cuantice: măcar putem spune în deplină siguranță că, în drumul său de la A la B, particula *poate încerca toate traseele deodată.*

Oare neclaritatea traseelor contează, sau nu e decât o poliloghie filozofică? Cu siguranță contează, pentru că traseele alternative suferă interferențe reciproce (la fel ca undele de apă care ocolesc borna). Uneori, interferența creează „zone interzise" particulei (în punctele în care două unde se anulează, adică creasta și baza); pe de altă parte, îi pot încuraja apariția într-o altă regiune (în care undele se întăresc reciproc).

Scanned with OKEN Scanner

Efectele interferenţelor cuantice care au această natură par să îşi spună cuvântul în complexul molecular răspunzător de fotosinteză. Echipa din Chicago, căreia i s-au alăturat la scurt timp Graham Fleming şi grupul lui de la UC Berkeley, s-a concentrat asupra bacteriilor sulfuroase verzi. Aceşti microbi trăiesc în lacuri şi în preajma izvoarelor vulcanice din oceane, până la o adâncime de cinci kilometri. Lumina solară nu pătrunde până acolo, însă izvoarele fierbinţi emit o luminiscenţă roşie, abia vizibilă: cu ajutorul acestei surse slabe de lumină îşi duc viaţa bacteriile. „Slabă" e cuvântul potrivit: s-a estimat că fiecare complex fotosintetic primeşte aproximativ un singur foton pe zi. Asta înseamnă o bilionime dintr-o bilionime din ce ar primi frunza unei plante de la suprafaţă. Având la dispoziţie atât de puţini fotoni, bacteriile sulfuroase verzi trebuie să exploateze la maximum ce obţin şi, de fapt, eficienţa lor se apropie de 100%, pierzând energie puţină sau deloc.

Iată cum funcţionează. Fotonii intră pe rând şi sunt absorbiţi undeva înăuntrul unui mănunchi de antene captatoare de lumină, fiecare prevăzută cu un tip de clorofilă (în total, 200.000 de molecule). Aproximativ o picosecundă mai târziu (a bilionima parte dintr-o secundă), energia captată apare în centrul de reacţii chimice. Ca să ajungă acolo, energia traversează ceva asemănător în linii mari cu cablul sau ghidul de unde care leagă antena de pe acoperiş de televizor (cel puţin în perioada anterioară apariţiei televizoarelor cu fibră optică). În cazul fotosintezei, rolul cablului e jucat de o punte moleculară cunoscută sub numele de complex FMO, formată din opt subunităţi moleculare aflate la o distanţă de 1,5 nanometri între ele, fiecare compusă din clorofilă fixată pe o schelă proteică. Fotonul în sine e absorbit şi dispare, dar energia lui e captată (într-o formă pe care o voi descrie mai jos) şi intră în complexul FMO printr-o structură moleculară căreia biologii i-au dat numele atrăgător de „placă de bază", unde e primită de una dintre subunităţile FMO, apoi e dată celorlalte ca o

Scanned with OKEN Scanner

ştafetă până când ajunge la o subunitate adiacentă „fabricii" (centrul de reacţie), unde e predată pentru a alimenta reacţia chimică. Întregul proces e o cursă contracronometru ce urmăreşte să livreze marfa înainte ca vreo tulburare exterioară să întrerupă activitatea.

Poate că aranjamentul pare alambicat, lăsând loc liber erorilor, întârzierilor şi riscului de „a scăpa ştafeta" pe drum. Toate moleculele implicate sunt mari şi complicate şi nestatornice din pricina agitaţiei termice. E uşor să ne imaginăm cum energia preţioasă, recoltată cu atâtea eforturi şi destinată centrului de reacţie, poate ajunge să se împrăştie în infrastructura complicată pe care o traversează. Dar nu se întâmplă aşa ceva. Energia ajunge neatinsă în timp record. Înainte, se presupunea că transportul de energie traversează complexul FMO printr-o serie de salturi simple realizate orbeşte în gălăgia termică a mediului molecular. Însă această abordare pare prea nefiabilă pentru un mecanism calibrat atât de precis. Iar aici intră în joc mecanica cuantică.

Ca să vă faceţi o idee despre explicaţia cuantică, daţi-mi voie mai întâi să descriu sub ce formă e stocată energia. Când fotonul e absorbit, eliberează un electron din molecula-antenă (cunoscutul efect fotoelectric), lăsând în urmă un „orificiu" încărcat pozitiv. Întrucât electronul e fixat într-o matrice moleculară, nu se desprinde. În loc de asta, rămâne legat nu prea strâns de orificiu, într-o orbită foarte mare (fizicienii spun că s-a „delocalizat"). Întregul ansamblu se numeşte „exciton". Excitonul poate la rândul său să se comporte în multe privinţe ca o particulă cuantică, posedând proprietăţile de undă. Acest exciton, şi nu electronul ca atare, e trecut prin complexul FMO. Din punctul de vedere al traseelor, excitonul poate merge pe multe drumuri şi, dacă e păstrată coerenţa cuantică, *chiar le va urma* – simultan. În termeni mai puţin stricţi, excitonul poate evalua toate opţiunile şi poate simţi care e cel mai bun traseu către centrul de reacţie, apoi porneşte de-a lungul acestuia.

Scanned with OKEN Scanner

Descriu aici un tip de demon extraordinar, un superdemon cuantic care „știe" toate drumurile posibile și îl poate alege pe cel câștigător. În termeni mai riguroși, ipoteza e cea potrivit căreia interferența constructivă are loc în cazul mai multor molecule din complexul FMO, astfel încât excitonii coerenți să poată optimiza eficiența și să transporte energia în centrul de reacție înainte să se piardă în mediul molecular. Tot acest proces durează aproximativ 300 de femtosecunde (o femtosecundă e a mia parte din a bilionima parte dintr-o secundă).

Pentru a studia acest mecanism complicat, grupul de la Berkeley a folosit lasere ultrarapide pentru a excita un complex FMO în laborator. Au reușit să meargă pe urma energiei când aceasta se unduia prin vâltoarea moleculară și au descoperit că un soi de efect de „bătăi cuantice" (oscilații coerente) contribuie la transferul de mare viteză al energiei.

Rezultatele acestor experimente au fost o surpriză totală, întrucât părea că dansul atent echilibrat al excitonilor avea să fie distrus de agitația termică. La prima vedere, coerența cuantică e păstrată cam de o sută de ori mai mult timp decât prevăzuseră calculele inițiale. Cu toate că zgomotul termic a contribuit, fără îndoială, la acest lucru, calculele mai recente[6] sugerează că puțin zgomot poate fi chiar bun: adică, în mod paradoxal, poate *crește* eficiența transferului de energie în condițiile potrivite (în cazul de față, dublând-o). Sistemul fotosintetic pare să fi dezvoltat pe cale evolutivă exact „condițiile potrivite".

Fotosinteza specifică plantelor e mai complicată decât cea întâlnită la bacterii și încă nu e limpede dacă efectele cuantice descoperite în cel de-al doilea caz sunt mai mult sau mai puțin importante decât în primul. Însă experimentele Engel–Fleming ne spun că transportul de energie asistat cuantic joacă un rol în biologie în cel puțin unul dintre procesele fundamentale de exploatare a luminii.

Scanned with OKEN Scanner

Păsări fantomatice

Oare prin deşteptăciunea ta s-a îmbrăcat în pene şoimul şi îşi întinde aripile ca nişte seceri, spre miazăzi? —Iov 39:26*

Deşi felul în care păsările navighează a fost studiat în mod informal vreme de mai multe secole, abia la începutul secolului al XVIII-lea au început ornitologii să ţină evidenţe sistematice. Johannes Leche, profesor de medicină la Universitatea Turku din Finlanda, a observat că lăstunul de casă e primul care soseşte în acele regiuni friguroase (6 mai, de regulă), urmat de rândunică (10 mai). (Habar nu aveam că păsările sunt atât de punctuale.) Observarea directă a tiparelor de migraţie a fost suplimentată apoi de instalarea unor inele la picioarele păsărilor şi, în ultima vreme, de urmărirea prin radar şi satelit. Acum, s-au aflat foarte multe lucruri despre acest fenomen extraordinar, inclusiv pornind de la câteva statistici absolut năucitoare. De exemplu, chira polară poate să zboare peste 80.000 de kilometri pe an, migrând de la locurile de împerechere din zonele arctice până în Antarctica, unde aşteaptă să treacă iernile nordice. Pitulicea cu cap negru, care cântăreşte doar 12 grame, realizează un zbor fără oprire peste Oceanul Atlantic din New England în Caraibe, unde îşi petrece iarna. Unii porumbei găsesc drumul spre casă după zboruri de sute de kilometri.

Cum reuşesc păsările să facă aşa ceva?

Cercetătorii au descoperit că păsările folosesc mai multe metode de orientare, ghidându-se după Soare şi stele, dar şi folosindu-se de stimuli vizuali şi olfactivi. Dar asta nu poate fi întreaga poveste, pentru că unele păsări reuşesc să navigheze

* *Biblia Ortodoxă*, Institutul Biblic şi de Misiune al Bisericii Ortodoxe Române, Bucureşti, 1988 (*n. tr.*).

Scanned with OKEN Scanner

noaptea, chiar și când cerul e înnorat. O explicație ar fi câmpul magnetic al Pământului, care e independent de vreme. Unele experimente cu porumbei voiajori de la începutul anilor '70 au arătat că o pasăre căreia i se prinde un magnet de picior nu se mai poate orienta corect. Însă cum poate o pasăre să simtă câmpul magnetic al Pământului, din moment ce acesta e extrem de slab?*

Unii fizicieni susțin că fizica cuantică e cea care le permite păsărilor să navigheze, întrucât le dă posibilitatea *să vadă* câmpul. Ceea ce înseamnă că în pasăre trebuie să existe un fel de busolă cuplată la creier ce îi permite să ajusteze traiectoria în zbor. Identificarea busolei n-a fost ușoară, însă în ultimii ani a apărut un candidat plauzibil ce depinde de mecanica cuantică: de fapt, de una dintre cele mai neobișnuite trăsături ale sale.

Toate particulele fundamentale de materie au o proprietate numită „spin". Ideea de corpuri rotitoare e, bineînțeles, cunoscută și destul de simplă: însuși Pământul se învârte. Gândiți-vă la un electron ca la un Pământ la scară mai mică, redus până la dimensiunile unui punct, dar păstrându-și rotația sau spinul. Spre deosebire de planete, fiecare electron are spin *exact* cât are sarcină și masă; e o proprietate fundamentală pe care o au în comun. Bineînțeles, electronii se rotesc și în atomi, iar în acest caz viteza și direcția pot varia, în funcție de ce atom și ce nivel de energie (orbită) ocupă. Dar spinul fix la care mă refer e intrinsec electronului, iar denumirea completă e, complet nesurprinzător, „spin intrinsec".

Ce legătură are asta cu păsările? Ei bine, electronii au și sarcină electrică (sunt prin definiție o particulă cu sarcină

---

* Acum câțiva ani, un coleg fizician a pretins că poate simți încotro e nordul chiar și legat la ochi și dezorientat. Punea această ispravă pe seama capacității de a detecta câmpul magnetic al Pământului. Din câte știu, nu au existat teste sistematice care să dovedească prezența acestei capacități la oameni.

Scanned with OKEN Scanner

electrică, de aceea se și numesc electroni). Michael Faraday a descoperit în 1831 că o sarcină electrică aflată în mișcare creează câmp magnetic. Chiar dacă electronul nu se mișcă din loc în loc, el tot se învârte, iar acest spin creează un câmp magnetic în jurul lui: toți electronii sunt mici busole. Prin urmare, dat fiind că sunt și magnetici, și electrici, electronii vor reacționa la un câmp magnetic extern la fel ca acul unei busole. Electronul va simți o forță din câmpul exterior care va încerca să-l răsucească astfel încât polii să se opună (nord–sud). Însă apare o complicație. Spre deosebire de acul unei busole, un electron se învârte. Când o forță externă acționează asupra unui corp aflat în rotație, acesta nu se învârte doar în sens opus și se aliniază, ci descrie o mișcare giratorie, proces numit „precesie". Cu alte cuvinte, însăși axa de spin se învârte în funcție de direcția forței aplicate. Cititorii familiarizați cu titirezii care se învârt pe un plan înclinat (care suferă fenomenul de precesie în jurul axei verticale datorită gravitației Pământului) știu la ce mă refer.

Un electron izolat care nu are altceva de făcut decât să simtă forța magnetică a Pământului va executa această mișcare giratorie de aproape 2.000 de ori în cazul de față. Însă majoritatea electronilor sunt în atomi, se învârt în jurul nucleului, iar câmpurile electric și magnetic interne ale atomului, create de nucleu și de alți electroni, acaparează câmpul slab al Pământului, care are efect neglijabil prin comparație. Dar dacă un electron e mutat din atom, lucrurile se schimbă. Acest fenomen se poate întâmpla dacă atomul absoarbe un foton. Forța magnetică a atomului slăbește rapid odată cu creșterea distanței față de nucleu, astfel încât câmpul Pământului devine, prin comparație, mai important pentru comportamentul electronului. Prin urmare, electronul eliminat se va roti diferit.

Ochii păsărilor sunt asaltați de fotoni tot timpul – până la urmă, la asta folosesc ochi. Există astfel ocazia ca electronii zburătoarelor să joace rolul de mici busole care să ghideze

Scanned with OKEN Scanner

pasărea, dar numai dacă există o modalitate prin care pasărea să știe ce fac electronii eliminați. Cumva, electronii perturbați de lumină trebuie să ia parte la o reacție chimică prin care să trimită în creierul păsării un semnal cu informația despre activitățile lor. Retina păsării e plină de molecule organice. Cercetătorii au depistat proteine din retină numite „criptocrome" care îndeplinesc sarcina despre care tocmai v-am vorbit.[7] Când e dislocat de un foton, electronul criptocrom nu își taie toate legăturile cu molecula care i-a fost cândva casă. Aici intervine fantomatica acțiune la distanță a lui Einstein, aflată aici în serviciul păsării. Electronul, deși expulzat din cuibul său atomic, poate rămâne corelat cu un al doilea electron, lăsat în urmă în atomul proteinei, dar, din cauza mediilor magnetice diferite, mișcările giratorii ale celor doi electroni se desincronizează. Această situație nu durează mult: electronul și molecula cu sarcină pozitivă (numită radical liber) lăsată în urmă sunt ținte perfecte pentru reacțiile chimice. (Multe afecțiuni, de la diabet la cancer, sunt puse pe seama radicalilor liberi care o iau razna în interiorul celulelor.) Conform teoriei busolei păsărilor, acești radicali liberi reacționează fie între ei (recombinându-se), fie cu alte molecule din retină pentru a forma neurotransmițători, care trimit apoi semnale către creierul păsării. Rata de reacție specifică neurotransmițătorilor variază în funcție de caracteristicile legăturii stranii și mișcărilor giratorii asimetrice ale celor doi electroni, care reprezintă o funcție directă a unghiului format de câmpul magnetic al Pământului și moleculele criptocrom. Așa că, în teorie, o pasăre ar putea să vadă câmpul magnetic întipărit în câmpul ei vizual. Ce folositor!

Există vreo dovadă în sprijinul acestei inseparabilități ciudate? Da, există. Un grup de cercetători de la Universitatea din Frankfurt a realizat experimente pe măcăleandri, care migrează din Scandinavia în Africa, și au constatat că modul în care se orientează depinde de lungimile de undă și intensitatea

Scanned with OKEN Scanner

luminii din mediu, așa cum prevedea și teoria.[8] Experimentele lor sugerează că păsările combină date vizuale și magnetice pentru a lua decizii în privința direcției de zbor. Grupul de la Frankfurt a încercat și să dubleze puterea câmpului magnetic din mediul înconjurător. Inițial, simțul de orientare al păsărilor a fost perturbat, însă inteligentele creaturi au rezolvat situația în aproximativ o oră și cumva și-au recalibrat aparatul magnetic astfel încât să compenseze pentru schimbarea din mediu.

Elementul decisiv a provenit din experimentele efectuate la UC Irvine de către Thorsten Ritz. În cadrul acestor studii, păsările au fost bombardate cu unde electromagnetice pe frecvențe radio (MHz). Când undele au fost lansate paralel cu câmpul geomagnetic nu s-a înregistrat nici un efect, dar când au fost lansate vertical, păsările s-au dezorientat.[9] Combinarea rezultatelor mai multor experimente în care s-au folosit frecvențe și condiții de lumină diferite arată prezența unei rezonanțe – un fenomen familiar în care energia absorbită de un sistem capătă valori maxime la o anumită frecvență, cum este cazul unui cântăreț de operă care sparge un pahar de vin când atinge nota corectă. Rezonanța e exact lucrul la care să ne așteptăm dacă explicația cuantică e corectă, deoarece undele radio au frecvențe de tranziție tipice pentru moleculele organice și e probabil să interfereze cu formarea inseparabilității.

A sosit era ornitologiei cuantice!

Demoni cuantici în nas

Simțul mirosului poate reprezenta un alt exemplu excelent al felului în care lucrează demonii cuantici din biologie. Până și oamenii, care nu se află prea sus în ierarhia capacității olfactive, pot distinge multe mirosuri diferite. Un parfumier iscusit (numit „nas“ în industrie) poate identifica sute de mirosuri

Scanned with OKEN Scanner

care diferă doar subtil între ele, cu un discernământ comparabil cu acela al unui oenolog desăvârşit.

Cum funcţionează procesul? Iată ce se întâmplă, în linii mari. În nas există mii de receptori moleculari (molecule care au cavităţi de diverse forme specifice). Dacă o moleculă din aer are forma potrivită, se va fixa în receptorul corespunzător, asemenea cheii într-un lacăt. Odată ce are loc alipirea, către creier e trimis un semnal care spune „Chanel No. 5!" sau ceva echivalent. Bineînţeles, simplific mult lucrurile: identificarea mirosurilor implică în general combinarea semnalelor din mai mulţi receptori. Totuşi, e limpede că receptorii olfactivi se comportă ca nişte demoni clasici maxwellieni: sortează foarte precis moleculele în funcţie de forma lor (nu de viteză, dar ideea fundamentală e aceeaşi) şi le resping pe cele nepotrivite, filtrând şi comunicând informaţia către creier în vederea supravieţuirii (e drept, detectarea parfumului Chanel probabil că nu are acest rol, lucru pe care nu-l putem afirma şi despre mirosul de fum).

Cu toate astea, modelul simplu lacăt-şi-cheie are problemele lui. Moleculele de aceeaşi dimensiune şi formă pot mirosi foarte diferit. Dar şi molecule foarte diferite pot mirosi asemănător. Dovezile ne indică un nivel mai fin de diferenţiere: un demon cu simţuri mai ascuţite. Potrivit unei vechi teorii (are deja zeci de ani), pe lângă dimensiunea şi forma moleculei, semnătura vibraţională ar putea juca la rândul său un rol. Moleculele pot vibra (şi chiar o fac, datorită agitaţiei termice, dacă vă amintiţi) şi, aşa cum instrumentele muzicale au tonuri distincte produse de amestecul de armonice, la fel au şi tiparele vibraţionale ale moleculelor. O moleculă din aer va ajunge, aşadar, la staţia de andocare din nas vibrând, iar un receptor conceput să „capteze vibraţiile" va realiza încă o diferenţiere. Mecanismul a rămas în mare parte un mister până în 1996, când Luca Turin, pe atunci la University College London, a sugerat că ar putea fi implicată mecanica cuantică, mai exact

Scanned with OKEN Scanner

tunelarea cuantică realizată de un electron dintr-o moleculă de miros spre receptor.[10] Turin s-a gândit că electronul care efectuează tunelarea e cuplat la stările vibraționale ale moleculei purtătoare de miros (un mecanism de rutină în fizica moleculară) și, mai mult, că nivelurile de energie a electronilor din molecula receptoare sunt sintonizate la frecvențele vibraționale specifice ale moleculei purtătoare de miros. Electronul care tunelează are rolul de a comunica identitatea moleculei care se pregătește de andocare prin absorbirea unei cuante de energie din vibrație (cunoscută fizicienilor sub denumirea de fonon – o cuantă a sunetului) și livrarea ei către receptor. Dacă energia electronului se potrivește cu structura nivelului de energie din receptor, tunelarea e înlesnită și informația e transmisă.

Ipoteza lui Turin a impulsionat teoria vibrației mirosului și a oferit o posibilă explicație pentru unele similarități și diferențe problematice între mirosuri: totul e pus pe seama tiparelor vibraționale, și nu pe forma moleculelor în sine. Teoria mai are și avantajul că poate fi testată. O metodă de probare e să modificăm tiparele vibraționale ale moleculei purtătoare de miros, lăsându-i chimia și forma neschimbate. Putem face asta înlocuind diverși atomi cu izotopii lor. Deuteriul, de exemplu, al cărui nucleu e format dintr-un proton și un neutron, e de aproape două ori mai greu decât hidrogenul normal, dar e identic din punct de vedere chimic. Schimbarea unui atom de hidrogen cu unul de deuteriu va lăsa neschimbată forma moleculei, dar va modifica frecvențele vibraționale într-un mod evident: atomii mai grei se mișcă mai încet când li se aplică aceeași energie, prin urmare vibrează la frecvențe mai joase. Există experimente ce par să confirme că deuterarea moleculelor schimbă mirosul, dar rezultatele rămân controversate și ambigue.[11] Între timp, Turin a efectuat un experiment cu musculițe de oțet și a descoperit că acestea pot distinge între o moleculă purtătoare de miros care conține hidrogen și o

Scanned with OKEN Scanner

moleculă identică, dar care conține deuteriu. Experimentatorii au învățat insectele să evite moleculele deuterate și au descoperit că musculițele se fereau și de moleculele neînrudite care prezentau tipare vibraționale identice acelora din molecula deuterată. Toate acestea consolidează teoria conform căreia tunelarea cuantică a informației vibraționale e secretul din spatele modului în care cel puțin muștele simt mirosuri.

Biologia cuantică: oare se va impune?

Timp de aproape un secol, mecanica cuantică a fost asemenea unei taine cabalistice. Dar astăzi (în mare parte grație informaticii cuantice) pisica lui Schrödinger a ieșit la iveală și cu toții suntem obligați să înfruntăm Fiara exponențială care stă la pândă în reprezentarea actuală a lumii. —Scott Aaronson[12]

Niels Bohr a remarcat cândva că persoanele care nu sunt șocate de mecanica cuantică n-au înțeles-o. Și e, fără îndoială, șocantă. Deși explică extraordinar de bine materia, mecanica cuantică sfâșie realitatea. Cuvintele „cuantic" și „straniu" merg inevitabil împreună. Stranii sunt lucruri precum o particulă care se află în două locuri în același timp, sau care se teleportează prin obstacole, sau care vizitează lumi paralele – lucruri care ar fi complet bizare dacă s-ar întâmpla în viața cotidiană. Dar ele se petrec tot timpul în microlumea atomilor și moleculelor. Cu atâta magie cuantică la dispoziție, ne-am aștepta ca viața să fi intrat pe fir. Și chiar așa s-a întâmplat! Așa cum am explicat în acest capitol, în ultimii ani s-au găsit tot mai multe dovezi care sugerează că unele procese biologice importante ar exploata anumite aspecte ale stranietății cuantice. Aceste procese ne sugerează că magia cuantică ar exista pe tot cuprinsul vieții. Dacă nu se reduce la o serie de fenomene ciudate, biologia cuantică ar putea transforma studiul vieții la fel de

Scanned with OKEN Scanner

profund cum a făcut-o biologia moleculară în urmă cu peste jumătate de secol.

Când Schrödinger a ținut faimoasele prelegeri din Dublin, mecanica cuantică se bucura de primul său triumf. Explicase multe dintre proprietățile materiei lipsite de viață. În plus, multor fizicieni din acele timpuri li se părea că mecanica cuantică era suficient puternică și suficient de stranie încât să poată explica și materia vie. Cu alte cuvinte, sperau ca mecanica cuantică, sau o posibilă „mecanică post-cuantică", să descopere un fel de „principiu vital" care fusese până atunci ascuns sub complexitatea materiei vii. În prelegerile sale, Schrödinger s-a folosit de câteva rezultate tehnice de rutină din mecanica cuantică pentru a răspunde la întrebarea despre cum poate informația biologică să fie stocată într-o formă stabilă, dar nu a încercat să invoce genul de efecte cuantice stranii pe care le-am descris în acest capitol pentru a explica proprietățile remarcabile ale vieții.

În deceniile care au urmat, puțini biologi au dat atenție mecanicii cuantice, majoritatea fiind mulțumiți să apeleze la modelele clasice cu bețe și sfere ale chimiei pentru a explica tot ce ține de biologie. Însă, în ultimii ani, interesul pentru biologia cuantică a crescut, chiar dacă ipotezele mai extravagante i-au dat acestui subiect o reputație întru câtva suspectă. Întrebarea esențială e următoarea: dacă în materia vie există cu adevărat fenomene cuantice, oare acestea sunt doar anomalii stranii, sau reprezintă vârful aisbergului care cuprinde *toate* procesele vitale ale vieții? Studiile de caz pe care le-am descris nu epuizează sub nici o formă toate efectele posibile ale biologiei cuantice pe care le-am investigat. Problema fundamentală, așa cum reiese din explicațiile alambicate pe care le-am oferit, este aceea că biologia e incredibil de complexă. În această complexitate există suficient loc pentru efecte cuantice, dar există și destul loc ca modelele cuantice teoretice simple să ne conducă pe un drum greșit.

Scanned with OKEN Scanner

Problema argumentării în favoarea biologiei cuantice e aceea că cele două cuvinte, „cuantic" și „biologie", reprezintă domenii aflate în tensiune. Efectele cuantice sunt foarte evidente în sisteme izolate, reci și simple, în vreme ce biologia e caldă și complexă, formată din multe părți care interacționează puternic. Mecanica cuantică e despre coerență. Perturbările externe sunt dușmanii coerenței. Dar, așa cum am explicat în capitolele anterioare, viața adoră zgomotul! Demonii biologiei exploatează energia termică pentru a crea și pentru a se deplasa. Materia vie este foarte agitată: moleculele se mișcă și se lovesc unele de altele, se agață și se zgâlțâie reciproc, fac schimb de energie și își rearanjează formele. Această mișcare infernală nu poate fi oprită în organismele vii la fel cum poate fi oprită în mediul atent controlat al unui laborator de fizică. Cu toate astea, există un teren de mijloc fertil în care zgomotul și coerența cuantică pot coexista îndeajuns de mult încât să se petreacă ceva util din punct de vedere biologic.[13]

Biologia cuantică nu prezintă interes doar pentru că putem explica viața cu ajutorul ei, ci și pentru că îi poate învăța pe specialiștii în inginerie cuantică o serie de trucuri foarte eficiente. Interesul principal al ingineriei cuantice din ziua de azi e informatica cuantică. Să luăm ca exemplu următoarea statistică. Un computer cuantic cu doar 270 de particule corelate (adică având între ele acea legătură stranie) ar avea la dispoziție o putere de procesare mai mare decât întregul univers observabil exploatat sub formă de computer convențional (care manipulează biți). Asta pentru că puterea unui computer cuantic crește *exponențial* cu numărul de componente corelate: așadar, numai 270 de particule subatomice corelate au 2^{270} de stări, ceea ce înseamnă aproximativ 10^{81} (comparați cu totalul de 10^{80} de particule din univers). Dacă toate aceste stări ar putea fi manipulate, rezultatul ar fi o putere de calcul inimaginabil de mare. Dacă un număr minuscul de particule are potențialul să proceseze o cantitate halucinantă de informații, nu ne-am

Scanned with OKEN Scanner

aştepta să vedem o astfel de procesare manifestându-se undeva în natură? Locul evident în care trebuie să căutăm e biologia.

Acum câţiva ani se spunea că aparatele moleculare care implementează codul genetic ar fi un fel de computer cuantic.[14] Cu toate că încă există puţine dovezi care să confirme că ADN-ul execută adevărate calcule cuantice, e posibil să aibă loc o formă de procesare a informaţiei la nivel cuantic. Demonul lui Maxwell nu e afectat de efectele distrugătoare ale entropiei şi nici de a doua lege pentru că transformă activitatea termică aleatorie în biţi de informaţie înmagazinaţi. Un demon cuantic maxwellian ar putea ţine la distanţă aceleaşi efecte termice distrugătoare care descompun coerenţa cuantică şi transformă zgomotul aleatoriu extern în qubiţi înmagazinaţi. Dacă viaţa şi-a creat astfel de demoni, care pot păstra coerenţa cuantică suficient de mult încât mecanismul genetic să manevreze qubiţii înmagazinaţi, atunci ar putea avea loc o creştere semnificativă a vitezei la care informaţia e procesată. Chiar şi o îmbunătăţire cât de mică ar însemna un avantaj şi ar fi favorizată de evoluţie.

Cu toate astea, mă văd nevoit să închei capitolul cu un avertisment. Toate efectele biologiei cuantice pe care le-am prezentat aici au fost intens dezbătute.[15] Unele afirmaţii iniţiale sunt destul de exagerate şi e nevoie de mai multe experimente înainte să tragem concluzii definitive. Complexitatea sistemelor biologice zădărniceşte orice metodă simplă prin care să separăm efectele cuantice asociate cu unda de mişcarea clasică vibratorie, motiv pentru care majoritatea experimentelor efectuate până acum rămân deschise unor interpretări alternative. S-ar părea că încă lucrurile nu s-au tranşat.[16]

Cum rămâne cu speculaţia conform căreia biologia ar pune în practică calculul cuantic? Cu mult timp în urmă, în timp ce reflectam la profunzimea calculului cuantic, mi-a trecut prin minte un gând ciudat. E greu să ne imaginăm că un sistem non-viu şi natural ar putea efectua calcul cuantic, aşa că am

Scanned with OKEN Scanner

simțit nevoia să întreb de ce, din moment ce viața *nu* se folosește de această ocazie pentru a procesa informația exponențial mai repede, există o astfel de posibilitate. De ce au legile fizicii capacități informaționale dincolo de orice și-a imaginat Shannon dacă natura nu le-a folosit nicăieri în univers? Să fi rămas acest potențial informațional neatins și neexploatat de natură vreme 13,8 miliarde de ani doar ca să se folosească de el niște ingineri umani?

Îmi dau perfect seama că ceea ce am scris nu e sub nici o formă un argument științific, ci unul filozofic (unii ar putea spune chiar teologic). Pun această problemă pentru că, în experiența mea de fizician teoretician, am descoperit că, dacă teoria fizică consacrată prevede că ceva e posibil, atunci natura se va folosi în mod invariabil de acel ceva. Nu trebuie decât să ne gândim la bosonul Higgs, prezis la nivel teoretic în 1963 și descoperit în realitate abia în 2012. Printre alte exemple se numără antiparticulele și particula omega minus. În toate aceste cazuri a existat un loc bine definit în natură pentru astfel de lucruri. Evident, există multe teorii speculative care fac predicții și care *nu* au fost confirmate pe cale experimentală, așa că argumentul meu e tot atât de fundamentat precum teoria în discuție. Însă mecanica cuantică e *cea mai* solidă teorie pe care o avem, iar ceea ce prezice nu e aproape niciodată pus sub semnul îndoielii. Mecanica cuantică are un loc rezervat gestionării exponențiale a informației. Să fi pierdut natura ocazia să îl ocupe? Nu cred.

Scanned with OKEN Scanner

6. APROAPE UN MIRACOL

Cât de remarcabilă e viaţa? Răspunsul e: foarte remarcabilă. Aceia dintre noi care ne ocupăm cu reţele de reacţii chimice nu am mai întâlnit niciodată aşa ceva.

—George Whitesides[1]

Universul e plin de complexitate, de la sisteme obişnuite precum izvoare învolburate şi fulgi de zăpadă la structuri cosmice precum nebuloasele şi galaxiile spiralate. Însă o clasă de sisteme complexe (viaţa) se dovedeşte extraordinar de remarcabilă. În prelegerile de la Dublin, Schrödinger afirma că o calitate definitorie a vieţii este faptul că reuşeşte să înfrângă tendinţa celei de-a doua legi a termodinamicii. Organismele vii reuşesc să sfideze entropia acumulând informaţie şi orientând-o spre anumite obiective. Prin cuplarea tiparelor de informaţie la tiparele reacţiilor chimice, folosind demoni ca să atingă un nivel ridicat de eficienţă termodinamică, viaţa generează coerenţă şi organizare dintr-un haos molecular. Una dintre cele mai importante întrebări ale ştiinţei e cum a apărut acest ansamblu unic.

Cum a început viaţa? Pentru că materia vie are o parte de hardware şi una de software (chimie şi informaţie), problema apariţiei sale e de două ori mai dificilă. Printr-o curioasă coincidenţă istorică, la numai trei săptămâni de la publicarea în *Nature* a faimosului articol al lui Crick şi Watson despre structura dublu-elicoidală a ADN-ului, ediţia din 15 mai 1953 a revistei *Science* prezenta un articol scris de un chimist puţin cunoscut, numit Stanley Miller. Intitulat „A production of amino acids under possible primitive Earth conditions" („Producţie de aminoacizi în posibile condiţii primitive de pe Pă-

Scanned with OKEN Scanner

mânt"), acest articol a ajuns să fie considerat deschizător de drumuri al încercărilor de a recrea viața în laborator.[2] Miller a introdus un amestec de gaze comune și apă într-un recipient și a trecut scântei electrice prin interiorul acestuia vreme de o săptămână, obținând un fel de mâzgă maronie. Testele chimice au arătat că această procedură simplă reușise să creeze unii dintre aminoacizii pe care îi folosește viața. Părea că Miller făcuse primul pas pe drumul lung către viață, având la dispoziție doar o sticlă cu gaz și doi electrozi. Aceste două articole (unul despre molecula informațională uriașă a vieții și celălalt despre elementele chimice fundamentale ale acesteia) simbolizează foarte bine problema centrală a biologiei: ce a fost mai întâi, chimia organică complexă sau tiparele complexe de informație? Sau cumva s-au stimulat reciproc să apară în același timp? E limpede că, de una singură, chimia nu reușește să explice viața. Trebuie să explicăm și originea tiparelor de informație organizată. Și nu doar de informație: trebuie să știm și cum au apărut *operațiile logice* din molecule, inclusiv înmagazinarea informației digitale și instrucțiunile codate matematic, care implică existența unui conținut *semantic*. Informația semantică e un concept de nivel superior care pur și simplu nu are sens la nivelul moleculelor. Chimia, indiferent cât de complexă ar fi, nu poate produce niciodată codul genetic sau instrucțiuni contextuale. A cere chimiei să explice informația codată e ca și cum le-am cere componentelor fizice ale unui computer să-și scrie propriile programe de operare. Ca să explicăm pe deplin originea vieții trebuie să înțelegem mai bine principiile organizaționale ale fluxului și înmagazinării de informație și felul în care aceasta se cuplează cu rețelele chimice, principii definite suficient de larg încât să cuprindă atât lumea însuflețită, cât și pe cea neînsuflețită. Iar întrebarea principală este: pot asemenea principii să derive din fizica pe care o cunoaștem, sau au nevoie de ceva complet nou?

Scanned with OKEN Scanner

La început...

Francis Crick a spus la un moment dat că apariția vieții că ar fi „aproape un miracol, atât de multe sunt condițiile care ar fi trebuit satisfăcute pentru a o pune în mișcare".[3] Și e adevărat: cu cât viața pare mai „miraculoasă", cu atât e mai greu să ne dăm seama cum ar fi putut să apară. În 1859, a fost publicată *Originea speciilor*, marea operă a lui Charles Darwin. În carte, biologul britanic oferă o explicație minunată despre cum a evoluat viața pe Pământ de-a lungul a miliarde de ani, de la simpli microbi la bogăția și complexitatea biosferei de astăzi. Însă a omis în mod voit întrebarea despre cum a apărut viața. „La fel de bine am putea specula despre originea materiei", a remarcat el într-o scrisoare către un prieten.[4] Astăzi, nu am făcut prea multe progrese față de atunci (doar că înțelegem mai mult sau mai puțin că originea materiei se află în Big Bang). Capitolele precedente l-au convins, sper, pe cititor că viața nu e doar un fenomen oarecare, ci unul cu adevărat remarcabil și special. Așadar, cum putem explica trecerea de la non-viață la viață?

Enigma apariției vieții e formată, de fapt, din trei probleme: când, unde și cum a început viața? Dați-mi voie să mă ocup întâi de planul temporal. Registrul fosil are o vechime de până la 3,5 miliarde de ani, mergând în trecut până în era geologică numită Arhaic. E greu să găsim roci atât de vechi, darmite roci care să conțină și fosile. Însă un afloriment de silex din acea eră a fost studiat intens. Se află în regiunea Pilbara din vestul Australiei, la cam patru ore de mers cu mașina prin sălbăticie pornind din orașul Port Headland. Terenul e accidentat, aspru, aproape lipsit de vegetație și brăzdat de albii în general uscate ce tind să se inunde foarte repede. Aici, dealurile au o tentă roșiatică, iar aflorimentele stâncoase ascund urme importante de activitate microbiană străveche. Datarea rocilor ne arată că planeta noastră găzduia deja o formă primitivă de viață după

Scanned with OKEN Scanner

un miliard de ani de la formare. Cea mai convingătoare probă e furnizată de niște trăsături geologice ciudate cunoscute sub denumirea de stromatoliți. Arată ca niște șiruri de linii curbate sau mici cocoașe care decorează suprafețele stâncoase expuse. Dacă interpretarea e corectă, aceste trăsături sunt rămășițele a ceea ce, în urmă cu 3,5 miliarde de ani, erau denivelări acoperite de microbi, create de colonii microbiene care au depozitat succesiv covoare de material granulat pe suprafețele expuse, strat după strat. Există doar câteva locuri pe Pământ unde se pot vedea structuri stromatolite similare, cu tot cu locuitorii lor microbieni vii. Majoritatea geologilor sunt încrezători că stromatoliții de la Pilbara (și alții din roci mai tinere) sunt relicvele fosile a ceva asemănător care datează din trecutul foarte îndepărtat. Aceeași formațiune geologică de la Pilbara conține semne suplimentare de viață în rămășițele unui vechi sistem de recifuri și în câțiva microbi fosilizați. E greu să ne dăm seama doar după forme că „fosilele" sunt mai mult decât urme în piatră; orice materie organică a dispărut de multă vreme. Totuși, în ultimul timp, interpretarea biogenică a primit un impuls.[5] Cam un procent din carbonul de pe Pământ există sub forma izotopului mai ușor C^{12}. Viața preferă această formă mai ușoară, prin urmare fosilele conțin puțin mai mult izotop C^{12}. O analiză a rocilor de la Pilbara a demonstrat că ponderea de izotop de carbon e corelată cu forma urmelor, ceea ce ar indica fosilele unor specii microbiene diferite. Rezultatele sunt greu de explicat în mod non-biologic.

Dovezile de la Pilbara ne spun că viața apăruse pe Pământ în urmă cu 3,5 miliarde de ani, dar nu ne dau nici un indiciu cu privire la momentul în care s-a format. E posibil ca toate celelalte urme mai vechi de activitate biologică să fi fost distruse de procese geologice normale și de bombardamentul cu asteroizi pe care l-a suferit planeta noastră până acum aproximativ 3,8 miliarde de ani (același bombardament care a săpat cratere în Lună). Problema e lipsa rocilor mai vechi.

Scanned with OKEN Scanner

Groenlanda are roci care datează de acum 3,8 miliarde de ani, cu semne de modificare biologică, dar nu sunt concludente. În orice caz, Pământul în sine are o vechime de doar 4,5 miliarde de ani, prin urmare viața a fost prezentă aici cel puțin în proporție de 80% din istoria sa.

Unde a început viața?

Dacă perioada apariției vieții poate fi aproximată într-o oarecare măsură, e mult mai greu să ghicim *locul* unde a apărut aceasta pentru prima oară. Nu mă refer la latitudine și longitudine, ci la contextul geologic și chimic.

Primul lucru care trebuie spus e că nu există nici o dovadă concludentă că viața terestră *a apărut* pe Pământ. E posibil să fi început altundeva și să fi ajuns pe Pământ gata făcută. De exemplu, poate a apărut pe Marte, care acum mai bine de 3,5 miliarde de ani era mai caldă și mai umedă decât azi, mai asemănătoare Pământului. Din anumite puncte de vedere, Marte a reprezentat un mediu *mai* favorabil pentru chimia prebiotică. Efectele bombardamentului cu asteroizi e posibil să fi fost mai puțin grave, iar alcătuirea chimică a planetei roșii să fi fost mai bună pentru susținerea metabolismului. Evident, trebuie să fi existat un mod prin care viața a ajuns de pe Marte pe Pământ, și chiar a existat. Bombardamentul cu asteroizi și comete, care a fost intens în istoria timpurie a sistemului solar (și care nu a încetat pe deplin niciodată), poate disloca cantități uriașe de roci în spațiu, multe dintre ele ajungând pe orbita Soarelui. O fracțiune din rocile aruncate de pe Marte vor cădea până la urmă pe Pământ (și invers: rocile terestre ajung pe Marte). Rocile de pe Marte care au căzut asemenea meteoriților au fost strânse peste tot în lume; universitatea la care lucrez are și ea câteva. Pe parcursul istoriei planetei noastre, trilioane de tone de materie marțiană au căzut pe Pământ. Captiv într-o bucată de piatră, un microb ar fi putut să reziste condițiilor

Scanned with OKEN Scanner

vitrege din spațiul cosmic. Cel mai mare pericol îl reprezintă radiațiile, dar chiar și o rocă de dimensiuni medii ar bloca mare parte din ele. S-a estimat că unii microbi rezistenți la radiații ar putea supraviețui milioane de ani în roci spațiale, o perioadă în care se poate încadra fără probleme drumul până pe Pământ și însămânțarea lui cu viață marțiană. Același scenariu funcționează și în sens invers: microbii terești viabili pot ajunge pe Marte. Asta înseamnă că Pământul și Marte nu se află în carantină una față de cealaltă. E posibil ca pe parcursul istoriei să fi existat contaminare reciprocă prin viață microbiană. E greu de stabilit dacă viața pe Pământ a început aici, și nu acolo. E posibil, dar mai puțin probabil, ca viața să fi ajuns pe Pământ de pe Venus, care acum e foarte ostilă vieții, dar care e posibil să fi fost primitoare acum câteva miliarde de ani. O altă posibilitate, luată în serios în unele cercuri, e aceea că viața ar fi fost incubată într-o cometă și ar fi ajuns pe Pământ fie prin impact direct, fie (mai probabil) din praful cometei, care a ajuns pe suprafața planetei noastre când corpul ceresc a trecut razant pe lângă ea.

Dacă mutăm leagănul vieții de pe Pământ altundeva nu avansăm prea mult în căutarea răspunsului la întrebarea importantă despre contextul geologic care a înlesnit apariția vieții. Au fost vehiculate mai multe scenarii: izvoarele vulcanice din adâncul oceanelor, lagunele în curs de uscare, porii din rocile suboceanice – lista e lungă. Cam singurul lucru asupra căruia toată lumea cade de acord e că oxigenul gazos ar fi fost un factor inhibitor. Astăzi, organismele complexe au nevoie de oxigen ca să realizeze procesul de metabolism, dar aceasta a fost o schimbare târzie. Pe Pământ, până acum aproximativ două miliarde de ani, nu exista foarte mult oxigen liber, iar nivelul actual de oxigen a fost atins în ultimul miliard de ani. Poate că oxigenul e bun pentru respirație, dar e o substanță foarte reactivă care atacă și descompune moleculele organice. Viața aerobă și-a creat tot felul de mecanisme ca să reziste (cum

Scanned with OKEN Scanner

ar fi antioxidanții). Chiar și așa, moleculele reactive organice de oxigen afectează în mod regulat ADN-ul și conduc la apariția cancerului. Când discutăm despre originea vieții, oxigenul liber e un pericol.

Printre elementele esențiale vieții se numără și oxigenul, bineînțeles, dar și hidrogenul, azotul, carbonul, fosforul și sulful. Elementul cu adevărat esențial e carbonul, baza chimiei organice, și o alegere ideală datorită varietății nesfârșite de molecule complexe pe care le poate forma. Chimiștii își imaginează că viața a făcut primii pași într-un loc unde exista o rezervă consistentă de carbon (furnizată, de exemplu, de dioxidul de carbon), dar și de hidrogen, poate liber sau ca parte a metanului ori hidrogenului sulfurat. Potrivit unei teorii populare, viața a apărut în apropierea izvoarelor vulcanice din adâncurile oceanului, unde există mult sulf și unde suprafețele stâncoase oferă tot soiul de catalizatori posibili. Oamenii de știință s-au concentrat asupra unor astfel de locuri datorită faptului că s-au descoperit ecosisteme bogate aglomerate lângă izvoare suboceanice, periculos de aproape de scurgerile clocotite venite din adâncimile vulcanice. Organismele aflate la baza lanțului trofic sunt microbii iubitori de căldură, numiți „hipertermofile". Unele dintre aceste ființe cutezătoare duc o viață înfloritoare în apă la temperaturi de peste 120°C (apa nu fierbe la această temperatură din cauza presiunii mari). Nimeni nu se aștepta să găsească viață în adâncurile întunecate, și cu atât mai puțin în regiunile cu înaltă presiune de lângă vulcani. Dar surpriza nu s-a oprit acolo. Una dintre cele mai uluitoare descoperiri din ultimele decenii în materie de biologie e că viața nu se limitează la suprafața Pământului sau la oceane, ci se întinde mult sub pământ, atât pe uscat, cât și sub fundul oceanelor. Încă încercăm să descoperim cât de extinsă e această biosferă subterană, însă deja am descoperit microbi care trăiesc la câțiva kilometri sub pământ, în roci (extremofi-

Scanned with OKEN Scanner

lele din Africa de Sud pe care le-am pomenit în capitolul 2 sunt un astfel de exemplu).*

S-a iscat o dezbatere vie pe seama întrebării dacă viața *a început* în adâncul scoarței Pământului sau dacă s-a infiltrat acolo după ce mai întâi s-a impus la suprafață (sau după ce a venit, poate, de pe Marte). Secvențierea genetică a demonstrat că hipertermofilele ocupă cea mai adâncă și, în consecință, cea mai veche ramură a arborelui vieții, sugerând că rezistența la căldură e o veche trăsătură a biologiei terestre. Dar asta nu înseamnă neapărat că primele vietăți erau hipertermofile. E posibil ca viața să fi început într-un mediu mai răcoros și apoi să se fi diversificat, unii microbi construindu-și mecanismele necesare de reparare a daunelor provocate de căldură, astfel încât să poată coloniza zonele fierbinți din apropierea izvoarelor oceanice. Cum bombardamentul timpuriu a presupus, probabil, și impacturi cu obiecte suficient de mari încât să sterilizeze termic zone întinse ale suprafeței (dacă nu chiar întreaga planetă), atunci trebuie să fi supraviețuit numai microbii iubitori de căldură din subteran. Astfel, ei ar reprezenta mai degrabă rezultatul efectului „gâtului de sticlă" genetic, și nu prima formă de viață. În clipa de față, nu avem cum să aflăm.

Înarmați cu o noțiune rudimentară referitoare la contextul chimic (fără oxigen!), specialiștii au încercat vreme de zeci de ani să recreeze în laborator condiții care să ne arate primii pași de pe lungul drum către viață, în urma eforturilor de pionierat ale lui Miller din 1953. Ulterior, au fost efectuate multe experimente prebiotice de sinteză dar, ca să fim onești, n-au dus prea departe, în ciuda dedicării și ingeniozității cercetătorilor. Comparativ cu standardele complexității moleculare, aceste tentative au rezultate neglijabile.

---

* Când a propus la sfârșitul anilor '80 că s-ar putea să existe o biosferă adâncă și fierbinte, astrofizicianul Thomas Gold a fost ridiculizat. Însă a avut perfectă dreptate.

Scanned with OKEN Scanner

Există un motiv fundamental pentru care eforturile de a produce viață în laborator nu ne vor ajuta probabil să dezlegăm misterul apariției vieții. Așa cum am insistat pe parcursul cărții, viața se deosebește de oricare alt fenomen prin capacitatea sa de a înmagazina și procesa informația într-o manieră organizată. Bineînțeles, viața presupune și o chimie complexă. Moleculele organice formează substratul în care viața își duce la bun sfârșit activitatea de tip software. Dar asta nu e decât jumătate din poveste, adică partea ce ține de hardware. Evident, *a existat* un traseu chimic de la non-viață la viață, chiar dacă nu avem nici o idee care a fost, însă e posibil ca etapele chimice să nu fi fost la fel de importante ca tranziția cu adevărat esențială: cea de la un haos molecular incoerent la gestionarea organizată a informației. Cum s-a mai întâmplat *asta*?

Cum a apărut viața?

Am lăsat la urmă cea mai dificilă problemă: felul în care a apărut viața. Răspunsul scurt e că nimeni nu știe! Mai rău: nimeni nu știe nici măcar cum să înceapă să estimeze șansele apariției vieții. Însă multe lucruri depind de răspuns. Dacă viața începe ușor, universul ar trebui să fie plin de ființe vii. Mai mult, dacă viața terestră e produsul unui univers care cuprinde un fel de principiu vital în legile sale fundamentale, atunci locul oamenilor în marele plan cosmic e profund diferit decât dacă am fi produsul unui accident chimic.

După cum am mai spus, o necunoscută fundamentală în legătură cu traseul de la non-viață la viață ține de faptul dacă acesta a presupus un urcuș lent și statornic pe povârnișul variantei prebiotice a „muntelui improbabilității" sau dacă s-a desfășurat în salturi întrerupte de perioade lungi de oprire. Dat fiind că muntele improbabilității e incredibil de înalt, nu ar fi deloc eficient ca un amestec chimic să găsească un punct de sprijin pe povârniș pentru ca imediat după aceea să alunece

Scanned with OKEN Scanner

înapoi, în jos. Trebuie să existe un fel de clichet care să fixeze câștigurile și să limiteze pierderile cât timp sistemul așteaptă următorul pas. Însă ideile de acest fel, care par rezonabile, se lovesc de problemele teleologiei. O supă chimică nu știe că încearcă să creeze viață (o supă chimică nu știe nimic), așa că nu va lua măsuri să-și protejeze complexitatea cu greu obținută de ravagiile celei de-a doua legi a termodinamicii. Scenariile în care chimia „tinde" către viață sunt absurde din start. Această problemă nu mai e valabilă odată ce viața apare, pentru că selecția naturală favorizează avantajele și ADN-ul le poate stoca. Însă, în absența selecției naturale, chimia nu poate recurge la astfel de mecanisme.*

Problema alunecării către poalele muntelui afectează aproape toate studiile despre traseul tot mai complex către viață. Multe experimente și analize inteligente demonstrează formarea spontană a complexității în amestecul chimic, dar toate se lovesc de același impediment: ce se întâmplă mai departe? Cum poate o supă chimică să construiască ceva și mai complex pornind de la o complexitate apărută spontan? Oare acest proces se repetă până se ajunge la vârful muntelui prebiotic al improbabilității? Cea mai promițătoare evadare din această cămașă de forță vine din studiile despre ciclurile chimice „autocatalizatoare". În cazul de față, ideea este cea potrivit căreia anumite molecule, să spunem A și B, reacționează pentru a produce alte molecule, C, care se întâmplă să joace rol de catalizator în accelerarea producției lui A și B. Astfel, există o buclă de feedback: mai multe grupuri de molecule

* Există o istorie lungă a „darwinismului molecular", în care moleculele „goale" se pot reproduce cu eficiență variabilă, selecția naturală alegându-le pe cele mai bune. Așa-numita teorie a lumii ARN intră în această categorie. Chiar dacă sunt instructive, aceste studii sunt artificiale și presupun intervenția omului (pregătirea materialelor, realizarea selecției etc.) pentru a obține un rezultat. Relevanța pentru lumea naturală nu e deloc limpede.

Scanned with OKEN Scanner

Scanned with OKEN Scanner

își catalizează propria producție. Mergând la un alt nivel, ar putea exista o rețea vastă de molecule organice care formează un sistem cvasistabil de autocatalizare, cu multe bucle de feedback interconectate ce formează o rețea complicată și autosuficientă de reacții.[6] Toate acestea sunt ușor de spus, dar există cu adevărat astfel de sisteme chimice? Da, există. Se numesc organisme vii și prezintă toate trăsăturile pe care le-am menționat mai sus. Dar acum ne învârtim în cerc, pentru că vrem să stabilim cum aceste minunate procese chimice se desfășoară înaintea vieții. Nu putem introduce artificial soluția în problema pe care încercăm s-o rezolvăm, și apoi să pretindem că am rezolvat-o.

Însă problema e mai gravă decât am lăsat de înțeles. Una dintre caracteristicile informaționale ale vieții e felul în care gestionează informația digitală cu ajutorul unui cod matematic. Să ne amintim că tripletele formate din litere (A, G, C, T) reprezintă aminoacizi distincți din instrumentarul de aproximativ 20 folosiți la formarea proteinelor. Instrucțiunile codate transportate de la ADN la mecanismul de asamblare a proteinelor (ribozomi, ARN de transfer etc.) exemplifică foarte bine cum funcționează teoria informației formulată de Shannon. Instrucțiunile joacă rolul de mesaj, canalul de comunicare îl constituie interiorul apos al celulei, iar zgomotul sunt daunele mutaționale termice sau chimice pe care le suferă ARN-ul mesager în drumul său.

O explicație a apariției vieții cunoscute trebuie să includă o explicație a apariției unei astfel de gestionări a informației digitale și (mai ales) a codului (nu trebuie să fie chiar codul pe care îl folosește viața, dar originea *unei forme* de cod tot trebuie explicată). E o problemă foarte dificilă. Biochimiștii Evgheni Kunin și Artem Novojilov o numesc „cea mai dificilă problemă a biologiei evoluționiste", o problemă „care va rămâne neelucidată dacă, pentru rezolvarea ei, nu se va face apel la înțelegerea originii principiului de codare și a sistemului de traducere

care îl încorporează". Cei doi nu consideră că soluția va fi găsită prea curând:

> Făcând o sinteză a stadiului cercetării evoluției codului, nu putem să nu fim sceptici. Se pare că întrebarea „de ce este codul genetic de acest fel și cum a apărut?", formulată cu peste 50 de ani în urmă, odată cu apariția biologiei moleculare, poate rămâne în picioare încă 50 de ani. Ne consolăm cu faptul că nu ne putem gândi la vreo problemă mai fundamentală în biologie.[7]

E adevărat că biologii au analizat problema apariției codului de multă vreme. O soluție care a devenit populară e aceea că viața primitivă nu a folosit vreun cod, că rezultatul de azi e un fel de actualizare de software care a evoluat mai târziu, odată ce s-a activat selecția naturală. Așa-numita teorie a lumii ARN s-a dezvoltat în această direcție. Din 1982, de când s-a descoperit că ARN-ul poate să înmagazineze informație *și* să catalizeze reacțiile chimice pe bază de ARN (nu la fel de bine ca proteinele, dar poate satisfăcător), biochimiștii s-au întrebat dacă o supă de ARN ar putea „descoperi" replicarea cu variație și selecție de una singură, proteinele intrând abia mai târziu în ecuație. Chiar dacă explicația se apropie de adevăr, e totuși imposibil să estimăm șansele ca un astfel de scenariu să se desfășoare pe vreo planetă. E ușor să ne imaginăm condiții extrem de adverse.

În urmă cu 50 de ani, majoritatea biologilor considerau că apariția vieții e o întâmplare chimică ce a presupus o serie de evenimente atât de improbabile, încât era aproape imposibil să se mai manifeste altundeva în universul observabil. L-am citat deja pe Crick. Contemporanul său francez Jacques Monod a criticat ideea că viața ar aștepta să apară exact atunci când condițiile îi permit s-o facă. Iată cum a rezumat el perspectiva majorității oamenilor de știință: „Universul nu purta în pântecele său viața", motiv pentru care „omul știe, în sfârșit, că este singur în imensitatea indiferentă a universului din care

Scanned with OKEN Scanner

a apărut datorită hazardului".[8] George Simpson, unul dintre marii neodarwiniști de după al Doilea Război Mondial, considera că SETI, căutarea vieții inteligente în afara Pământului, e „un joc de noroc în care avem cele mai slabe șanse din istorie".[9] Biologi precum Monod și Simpson și-au fundamentat concluziile pesimiste pe faptul că mecanismul vieții e atât de complex din atât de multe puncte de vedere, încât e de necrezut că ar putea apărea mai mult decât o dată în urma unei succesiuni de reacții chimice aleatorii. În anii '60, faptul de a întreține ideea probabilității existenței vieții extraterestre de orice fel, mai ales inteligentă, era echivalentul unei sinucideri științifice. Cercetătorii ar fi putut la fel de bine să-și exprime credința în zâne. Însă, până la începutul anilor '90, perspectiva se schimbase. Biologul Christian de Duve, laureat al Premiului Nobel, a descris universul drept „un focar de viață". Era atât de convins că viața apare oriunde are ocazia să facă asta, încât a considerat-o „un imperativ cosmic".[10] Aceasta pare să fie perspectiva dominantă astăzi, când se face deseori apel la numărul uriaș de planete locuibile despre care se crede că ar exista în univers. Iată ce a spus Mary Voytek, fost director al Institutului de Astrobiologie al NASA: „Ținând cont de toate celelalte planete din jurul tuturor celorlalte stele, e imposibil să ne închipuim că viața nu a mai apărut și altundeva".[11] Ei bine, nu e doar posibil, ci chiar ușor să ne închipuim. Să presupunem, de exemplu, că tranziția de la non-viață la viață a implicat o secvență formată din o sută de reacții chimice, fiecare având nevoie de un anumit interval de temperatură (primul, de pildă, 5–10°C, al doilea 20–30°C etc.). Poate că tranziția a presupus și intervale foarte clare de presiune, salinitate și aciditate, ca să nu mai vorbim de prezența mai multor catalizatori. Poate că există o singură planetă din universul observabil unde au fost îndeplinite toate condițiile ideale. Concluzia mea e următoarea: dacă o planetă e *locuibilă* nu înseamnă că e și *locuită*.

Scanned with OKEN Scanner

De ce acum e respectabil din punct de vedere științific să căutăm viața dincolo de Pământ, pe când în urmă cu jumătate de secol era un subiect tabu? Fără îndoială că descoperirea atâtor planete în afara sistemului solar a impulsionat enorm astrobiologia. Cu toate astea, chiar dacă în anii '60 nu fusese detectată nici o exoplanetă, majoritatea astronomilor socoteau că ele există. Astrobiologii se mai folosesc și de moleculele organice descoperite în spațiu, susținând că acestea sunt dovezi ale belșugului de „materie primă" fundamentală vieții răspândită pe cuprinsul universului. Poate că așa stau lucrurile, dar între elementele fundamentale precum aminoacizii și o celulă care metabolizează și se reproduce există o prăpastie uriașă de complexitate. Faptul că în spațiu e posibil să se fi făcut deja primul pas mic peste această prăpastie e aproape irelevant. Un alt motiv pentru optimismul actual cu privire la existența vieții extraterestre e faptul că unele tipuri de organisme pot supraviețui în condiții fizice mult mai variate decât se credea în trecut. Astfel, se deschide posibilitatea vieții pe Marte, de exemplu, și se extinde definiția unei planete „asemănătoare Pământului" în general. Însă argumentele acestea dau de două sau trei ori mai multe șanse vieții. Împotriva lor se ridică probabilitatea *exponențial* de scăzută ca o moleculă complexă să se formeze la întâmplare dintr-o supă de elemente fundamentale. În opinia mea, încă nu știm felul în care a apărut viața, așa că e zadarnic să estimăm care sunt șansele ca aceasta să se ivească. Nu putem determina probabilitatea unui proces necunoscut! Nu putem avea nici un fel încredere (*absolut deloc*) că investigarea spațiului cosmic va fi încununată de succes.

Există însă un argument în favoarea ubicuității vieții care are o oarecare forță. Carl Sagan a scris cândva: „Originea vieții trebuie să fie o chestiune cu probabilitate ridicată. De îndată ce condițiile îi permit, se ivește imediat!"[12] E adevărat că viața a apărut pe Pământ la scurt timp (geologic vorbind) după ce pe planetă au apărut condiții prielnice. Prin urmare, a conchis

Scanned with OKEN Scanner

Sagan, trebuie să fi început fără întârziere. Din nefericire, concluzia nu decurge în mod necesar din premisă. De ce? Ei bine, dacă viața *nu* ar fi apărut repede, nu ar fi avut timp să evolueze până la forme inteligente înainte ca Pământul să devină nelocuibil, ars de căldura tot mai puternică a Soarelui (în aproape 800 de milioane de ani, Soarele va fi atât de fierbinte, încât va fierbe oceanele). Mai simplu, dacă viața n-ar fi apărut repede, noi n-am mai fi fost aici. Prin urmare, dat fiind că existența noastră pe planetă *depinde* de formarea vieții aici, e foarte posibil ca apariția vieții terestre să fi fost un caz extrem de izolat, o uriașă întâmplare.

Viața creată în laborator

Se sugerează uneori că, dacă am putea crea viață în laborator, acest lucru ar demonstra clar că nu e o întâmplare, ci un proces care se poate petrece cu ușurință. Mass-media creează deseori impresia greșită că viața *a fost deja* creată în laborator, deseori cu subtextul moral că „joaca de-a Dumnezeu" poate conduce la apariția unor anomalii frankensteiniene. De exemplu, la 20 mai 2010, ziarul *Daily Telegraph* titra: „Omul de știință Craig Venter creează viață în laborator pentru prima oară, stârnind o dezbatere despre «joaca de-a Dumnezeu»". E un titlu foarte înșelător. Neînțelegerea provine din folosirea termenului ambiguu „a creat". Dintr-un anumit punct de vedere, oamenii creează viață de secole, cel mai bun exemplu fiind câinii. Câinii sunt animale artificiale obținute din lupi prin generații de încrucișări și selecție atentă. Acum 20.000 de ani existau lupi, dar nu și chihuaha sau dogul german. Mai aproape de zilele noastre, tehnicile de inginerie genetică precum transplantul de gene permit crearea multor organisme noi, inclusiv a unor alimente modificate genetic. O nouă tehnologie numită CRISPR permite rescrierea genomurilor aproape după bunul-plac. Venter și colegii săi au făcut ceva senzațional, care merita aten-

Scanned with OKEN Scanner

ție. Au luat o bacterie simplă (*mycoplasma genitalium*) și i-au înlocuit ADN-ul cu o versiune modificată. Cu alte cuvinte, Venter a păstrat aproape tot hardware-ul (celula) și doar a modificat software-ul (ADN-ul). Mycoplasma a pornit noile programe și a rulat instrucțiunile genetice modificate. Noul organism a fost numit *mycoplasma laboratorium*. Echivalentul la computere ar fi cazul în care v-ați cumpăra un laptop și ați instala propria versiune de sistem de operare, cu doar câteva modificări personale. Ar însemna că ați creat un computer? Nu tocmai. În discuțiile superficiale despre crearea vieții, chimia e confundată cu informația, hardware-ul cu software-ul. Esențial e că reconstruirea vieții existente (adică ceea ce a făcut Venter) se află la mare distanță de crearea vieții de la zero.

Uneori, presa sugerează că pare să fi fost atins un obiectiv și mai ambițios. La 27 iulie 2011, *New York Times* anunța, cu titlul dramatic „E viu! E viu! Poate chiar aici, pe Pământ", că „mai mulți chimiști și biologi [...] folosesc genetica modernă pentru a genera scânteia frankensteiniană care va elimina prăpastia dintre inanimat și animat. Ei spun că se apropie ziua în care substanțele chimice dintr-o eprubetă vor prinde viață". Relatarea e corectă. Însă definiția vieții folosită în experimentele cu pricina e extrem de laxă: un amestec de molecule care se pot copia cu erori ocazionale (mutații). Din punct de vedere chimic, experimentul e fără îndoială o realizare uluitoare și ne furnizează o piesă importantă din puzzle-ul vieții. Însă experimentatorii ar fi primii care ar recunoaște că sistemul de replicare moleculară e foarte departe de o celulă vie cu existență autonomă.

Problema fundamentală a acestor experimente nu e simplitatea componentelor. E vorba de ceva mult mai profund. Pentru a obține măcar o fracțiune din succesul anunțat până acum ar fi nevoie de echipament special și de tehnicieni, substanțe purificate și rafinate, un control extrem de fin al condițiilor

Scanned with OKEN Scanner

fizice și un buget substanțial. Însă, mai presus de orice, e nevoie de un proiectant inteligent (adică de un om de știință priceput). Specialistul în chimie organică trebuie să anticipeze cumva entitatea pe care o va produce. Nu-i denigrez pe oamenii de știință implicați și nici nu minimalizez potențialul uriaș al biologiei sintetice, ci doar relevanța ei pentru apariția *naturală* a vieții. Astrobiologii vor să știe cum s-a format viața *fără* echipament sofisticat, proceduri de purificare, sisteme care stabilizează mediul și (mai ales) fără un proiectant inteligent. Poate se va dovedi că viața e ușor de creat în laborator, dar ar rămâne la fel de greu să apară spontan în condițiile sordide și nesigure oferite de Mama Natură. La urma urmei, specialiștii în chimie organică pot crea imediat materiale plastice care nu se formează pe cale naturală. Obiecte simple precum un arc și o săgeată le poate face și un copil, dar nu ar putea fi create de un proces neînsuflețit. Prin urmare, faptul că am putea (într-o bună zi) descoperi că viața e ușor de creat nu reprezintă o dovadă că aceasta e un imperativ cosmic.

Discuția s-ar schimba dacă, prin sintetizarea vieții de mai multe ori și în mai multe feluri, oamenii de știință ar descoperi anumite principii comune ce pot fi aplicate apoi la condițiile din lumea reală. În felul acesta, s-ar ajunge la întrebarea profundă dacă astfel de principii se ascund deja în corpusul de cunoaștere științifică sau e nevoie de ceva complet nou. Schrödinger era deschis în această privință: „Prin urmare, nu trebuie să ne descurajeze dificultatea interpretării vieții prin legile obișnuite ale fizicii. Pentru că tocmai aceasta rezultă din cunoștințele pe care le-am căpătat despre structura materiei vii. Trebuie să fim pregătiți să găsim un tip nou de lege fizică ce o domină".[13] Sunt de acord cu Schrödinger. Cred că există noi legi și principii care apar în sisteme de procesare a informației ce au o complexitate suficient de mare și că explicația completă a originii vieții va proveni din studierea amănunțită a

Scanned with OKEN Scanner

unor astfel de sisteme. Voi reveni asupra acestei teme speculative în epilog.

Până atunci, nu am pierdut orice speranță pe frontul observațiilor.

CASETA 12: ESTE VIAȚA UN FENOMEN *PLANETAR*?

Viața terestră are trei caracteristici fundamentale: gene, metabolism și celule. E limpede că nu au apărut toate deodată, iar una dintre provocări e să stabilim care dintre ele s-a format mai întâi. Dintre cele trei, celulele sunt cel mai ușor de alcătuit. Există multe substanțe care produc spontan structuri celulare, deci o primă supoziție e aceea că nenumărate vezicule mici de pe Pământul tânăr au funcționat drept „eprubete" naturale în care natura a putut experimenta procese complexe de chimie organică. Celulele mai îndeplinesc o funcție esențială. Evoluția darwiniană are nevoie de o unitate pe baza căreia să selecteze, iar celulei i se potrivește acest rol. Până și o structură neînsuflețită se poate reproduce fisionând în două structuri mai mici și generând astfel o populație de entități identice care să îndeplinească un rol în evoluție. Fără existența *indivizilor*, versiunea inițială a darwinismului nu are sens.

În ultimii ani, a început să capete amploare o perspectivă opusă. Celulele poate că au apărut mai târziu, după ce procesele chimice complexe stabiliseră deja cicluri metabolice și rețele. E posibil ca această autoorganizare chimică să se fi petrecut „la grămadă" sau la scară mare (în oceane, de pildă). Odată ce procesele metabolice au devenit autosuficiente, se putea petrece o fragmentare în unități individuale, ajungându-se la ceea ce azi am recunoaște drept celule vii. Ar fi o abordare „de sus în jos" a apariției vieții. E posibil ca etapa precelulară să fi fost limitată la medii favorabile din punct de vedere termodinamic, cum ar fi izvoarele oceanice, sau să fi cuprins întreaga planetă. Eric Smith și regretatul Harold Morowitz descriu viața drept un fenomen în esență geologic sau planetar, în care geochimia Pământului tânăr coevoluează cu elementele care aveau să genereze viață. Ei susțin că, până la urmă, ceea ce numim viață a apărut dintr-o tranziție de fază de ordin planetar.[14] E o ipoteză interesantă.

Scanned with OKEN Scanner

Biosfera din umbră

Să presupunem că hazardul a jucat un rol secundar în apariția vieții și că procesul a fost determinat mai degrabă de legi, că a fost mai curând un imperativ, ca să folosim expresia lui de Duve. E oare posibil ca planul pentru viață să fie cumva întipărit în legile fizicii, fiind astfel un produs *așteptat* al unui univers intrinsec favorabil apariției sale? Poate. Problema e că o astfel de gândire e filozofică, și nu științifică. Ce fel de lege ar presupune că viața apare mai mult sau mai puțin automat oriunde îi permit condițiile? Nimic din legile fizicii nu sugerează că „viața" ar fi o stare sau destinație preferată. Toate legile fizicii și chimiei descoperite până acum sunt „indiferente față de viață": sunt legi universale cărora nu le pasă de stările biologice ale materiei mai mult decât de cele non-biologice. Încă nu am descoperit în natură acțiunea vreunui „principiu al vieții".

De dragul discuției, dați-mi voie să mă alătur optimiștilor care spun că viața apare cu ușurință și că e larg răspândită în cosmos. Dacă viața e inevitabilă și comună, cum putem obține dovezi în acest sens? Dacă am găsi o a doua mostră de viață (pe o altă planetă, pe un satelit natural sau pe o cometă) despre care am putea fi siguri că a apărut de la zero, independent de viața cunoscută nouă, teoria lui de Duve despre imperativul cosmic ar fi confirmată instantaneu. Din punctul meu de vedere, cel mai promițător loc în care să căutăm o a doua geneză se află chiar pe planeta noastră. Dacă viața chiar se formează atât de ușor cum susțin cu înflăcărare mulți oameni de știință, atunci trebuie să fi apărut de mai multe ori pe Pământ. Ei bine, cum știm că nu s-a întâmplat așa? A verificat cineva?

Gândiți-vă la următorul scenariu: viața apare pe Pământ în urmă cu patru miliarde de ani. După zece milioane de ani, planeta e lovită de un asteroid uriaș care eliberează atât de multă căldură încât oceanul fierbe și suprafața planetei e ste-

Scanned with OKEN Scanner

rilizată. Lovitura zdrobitoare nu distruge însă toate formele de viață. Cantități uriașe de rocă sunt aruncate în spațiu, unele dintre ele conținându-i pe primii locuitori minusculi ai Pământului. Încărcătura microbiană poate supraviețui multe milioane de ani în timp ce se învârte în jurul Soarelui. În cele din urmă, o parte din material își croiește drum înapoi pe Pământ, unde cade sub formă de meteoriți, aducând viața înapoi acasă. Între timp însă, în cele câteva milioane de ani de la impactul nimicitor, viața a început a doua oară (ne amintim că începe ușor), astfel încât, după revenirea materialului proiectat în spațiu, au început să existe *două* forme de viață pe planeta noastră. Cum bombardamentul cu obiecte uriașe a durat 200 de milioane de ani, e posibil ca același scenariu să se fi desfășurat de mai multe ori. Prin urmare, la încetarea bombardamentului din spațiu, este posibil ca pe planetă să fi locuit zeci de organisme formate independent. O întrebare fascinantă: e posibil ca măcar una dintre formele de viață „necunoscute nouă" să fi supraviețuit până azi? Aproape toată viața de pe Pământ e microbiană și nu ne putem da seama de la o simplă privire cum funcționează un microb. Trebuie să pătrundem în adâncurile sale moleculare. Așadar, printre microbii care reprezintă forma „noastră" de viață ar putea exista reprezentanți ai acestei „alte" vieți? Într-un fel, ar putea fi considerată o formă de viață extraterestră, în sensul că are o geneză independentă. Posibila populație microbiană necunoscută a fost numită „biosferă din umbră" și s-ar putea afla chiar sub nasul nostru (sau în nasul nostru), fiind trecută cu vederea până acum de microbiologi.[15]

E o provocare să identificăm viața din umbră. Eu și colegii mei am inventat strategii ample pe care le-am explicat în cartea *The Eerie Silence*. De exemplu, am putea căuta în locuri în care condițiile sunt atât de extreme încât nu poate supraviețui nici o formă de viață cunoscută (nici măcar extremofilele), precum izvoarele vulcanice din adâncul mării, în zonele

Scanned with OKEN Scanner

unde temperaturile depășesc 130°C. Pe de altă parte, dacă viața din umbră s-a amestecat cu viața cunoscută, identificarea ei devine mai dificilă. Un agent chimic care a distrus sau a încetinit metabolismul vieții cunoscute poate permite unei populații reduse de microbi din umbră să prospere și să iasă astfel în evidență. Câțiva oameni de știință au început cercetările în această direcție, dar, date fiind consecințele monumentale ale unei astfel de descoperiri, e surprinzător cât de puțină atenție a suscitat. Pentru a pune capăt acestei discuții, ar fi nevoie să descoperim un singur microb, doar unul, care să reprezinte un tip de viață necunoscut. Dacă ne-ar cădea în mâini (mai bine zis, sub microscop) un organism cu o biochimie suficient de diferită de a noastră încât să presupună în mod obligatoriu o geneză independentă, atunci am avea dovada că universul e fecund. Acest microb nu trebuie să se afle pe o planetă îndepărtată: ar putea fi chiar aici, pe Pământ. Dacă l-am descoperi mâine, ne-ar răsturna perspectiva asupra cosmosului și asupra locului omului în univers și ne-ar da de înțeles că avem șanse mai mari să găsim viață inteligentă în afara planetei.

Dacă ne uităm la ultimii 3,5 miliarde de ani, apariția vieții a fost prima și cea mai importantă transformare. Cu toate astea, istoria evoluției cuprinde alte două tranziții majore, pași esențiali fără de care progresul ar fi fost imposibil.[16] După apariția vieții, s-a scurs aproximativ un miliard de ani până la următoarea tranziție importantă: sosirea eucariotelor. Un alt pas mare a fost sexul. Ulterior a avut loc saltul de la unicelularitate la pluricelularitate. Ce anume a provocat aceste transformări ulterioare? Există trăsături comune? Eucariogeneza, sexul și pluricelularitatea – toate implică schimbări fizice importante. Însă adevărata semnificație nu stă în schimbările de la nivelul formei sau complexității, ci în reorganizarea concomitentă a *arhitecturii informaționale*. Fiecare pas înainte era o „actualizare de software" de proporții uriașe, iar cea mai mare actualizare s-a petrecut acum 500 de milioane

Scanned with OKEN Scanner

de ani, odată cu apariţia sistemului nervos central primitiv. Aşa că, astăzi, creierul uman reprezintă cel mai complex sistem cunoscut de procesare a informaţiei. Din acest sistem provine cel mai uimitor fenomen din toată cutia enigmelor vieţii: conştiinţa.

Scanned with OKEN Scanner

7. FANTOMA DIN MAȘINĂ

Cu privire la însuși fundamentul minții, conștiința,
știm cât știau și romanii: nimic.
—Werner Loewenstein[1]

La 13 ani după prelegerile din Dublin, Erwin Schrödinger a revenit la subiectul vieții într-o serie de prezentări ținute la Universitatea Cambridge intitulate „Bazele fizice ale conștiinței".[2] Concentrându-se asupra întrebării „Ce fel de proces material e asociat direct cu conștiința?", Schrödinger prezintă perspectiva unui fizician asupra acestui extraordinar fenomen. Printre numeroasele proprietăți ale vieții, conștiința se remarcă într-un mod deosebit. Originea ei e poate cea mai dificilă problemă cu care se confruntă știința actuală și e singura care rămâne indescifrabilă chiar și după două milenii și jumătate de dezbateri. Dacă întrebarea lui Schrödinger („Ce este viața?") s-a dovedit dificilă, „Ce este mintea?" poate fi considerată o întrebare mult mai complicată.

Explicarea minții sau a conștiinței e mai mult decât o provocare academică. Multe probleme etice și legale țin de măsura în care conștiința e prezentă într-un organism (dacă e prezentă). De exemplu, opinii despre avort, eutanasie, moarte clinică, stări vegetative sau sindromul „locked-in" pot depinde de măsura în care subiectul e conștient.* E corect să prelungim artificial viața unei ființe omenești inconștiente permanent? Cum

* Un caz mult dezbătut la momentul scrierii acestei cărți e cel al lui Charlie Gard, un bebeluș născut cu un sindrom aparent incurabil care nu-i permitea să reacționeze la majoritatea stimulilor. S-a luat decizia

Scanned with OKEN Scanner

ne putem da seama dacă victima unui atac cerebral e conştientă de mediul înconjurător şi are nevoie de îngrijire chiar dacă nu mai reacţionează la nici un stimul? Drepturile animalelor care implică definiţii ale cruzimii se bazează deseori pe argumente informale despre contextele în care un animal poate suferi sau „simţi" durere.* Acestor dileme li se adaugă domeniul emergent al inteligenţei nonbiologice. Poate un robot să fie conştient, iar dacă da, are drepturi şi îndatoriri? Dacă ar exista o definiţie acceptată a „gradului de conştiinţă", stabilită în baza unei teorii ştiinţifice solide, atunci poate că am putea evalua mai bine astfel de cazuri controversate.

Ne lipseşte o teorie exhaustivă a conştiinţei. În societăţile occidentale există ideea populară potrivit căreia mintea conştientă e o entitate de sine stătătoare. Această perspectivă îi este deseori atribuită filozofului francez din secolul al XVII-lea René Descartes, care susţinea că fiinţele omeneşti sunt formate din două lucruri: corp şi minte. Descartes se referea la *res extensa* (adică, în general, lucruri materiale) şi la *res cogitans* (lucruri mentale). În cultura populară creştină, al doilea concept a fost confundat cu sufletul, un ingredient imaterial suplimentar despre care mulţi cred că locuieşte în corp şi pleacă în altă parte când murim. Filozofii (şi, de fapt, teologii) moderni nu prea sunt de acord cu „dualismul cartezian", preferând să

---

judecătorească de a nu-l supune unor tratamente experimentale şi de a-l deconecta de la aparatele de menţinere a vieţii.

* În 1973, în Marea Britanie a existat un test juridic faimos: cazul creveţilor Eyemouth. O fată de 16 ani a fost acuzată de cruzime faţă de animale pentru că a gătit creveţi vii pe plită. În cele din urmă s-a renunţat la acuzaţie, dar nu înainte ca situaţia să atragă atenţia presei din Uniunea Sovietică. În acele vremuri, Marea Britanie trecea printr-o perioadă de instabilitate industrială şi declin economic. Moscova a citat cazul creveţilor drept exemplu al decadenţei Occidentului: cum putea poporul britanic să fie preocupat de asemenea banalităţi când muncitorii se revoltau împotriva sistemului capitalist pe cale să se prăbuşească?

Scanned with OKEN Scanner

considere oamenii ființe unitare. În 1949, filozoful Gilbert Ryle, de la Oxford, a inventat expresia peiorativă „fantoma din mașină" pentru a descrie poziția lui Descartes (pe care a numit-o „perspectiva oficială" asupra minții). Ryle a comparat mintea imaterială care ne conduce corpul mecanic cu mașina condusă de un șofer.[3] În opinia sa, această „dogmă" mistică nu e doar neadevărată, ci și profund greșită conceptual. Însă în imaginația populară mintea încă e considerată un fel de fantomă din mașină. În această carte, am argumentat că informația poate explica proprietățile uluitoare ale materiei vii. Manifestarea supremă a procesării biologice a informației este creierul, așa că e tentant să credem că un anumit aspect al informației va crea o punte între minte și materie, așa cum face între viață și non-viață. Tiparele de informație nu formează o „fantomă", tot așa cum nu formează nici vreo „forță vitală". Însă manipularea informației de către structuri moleculare asemănătoare demonilor maxwellieni ne amintește vag de ceea ce Ryle lua în râs. Ne referim însă la un dualism care nu e înrădăcinat în misticism, ci în principii fizice riguroase și în teoria computațională.

E cineva acasă?

Pentru început, să vedem la ce ne referim când vorbim despre conștiință în viața de zi cu zi. Cei mai mulți dintre noi se gândesc la o definiție rudimentară și la îndemână: conștiința înseamnă conștientizare a mediului înconjurător și a propriei existențe. Unii ar putea adăuga și noțiunea de liber-arbitru. Noi, oamenii, avem stări mentale care constau în sentimente, gânduri și senzații, iar lumea noastră mentală se leagă cumva de cea fizică prin creier. Explicația se cam încheie aici. Tentativele de a defini mai precis conștiința se lovesc de aceleași probleme ca și încercările de a defini viața, dar sunt mult mai frustrante. Matematicianul Alan Turing, renumit pentru că a pus bazele informaticii, a abordat această întrebare într-un

Scanned with OKEN Scanner

articol publicat în 1950 în revista *Mind*.[4] Prin complicata întrebare „Pot maşinile să gândească?", Turing a anticipat multe dintre dilemele actuale cu privire la inteligenţa artificială. Contribuţia sa principală a fost aceea că a definit conştiinţa prin ceea ce numea „jocul imitaţiei",* cunoscut şi ca „testul Turing". În opinia lui Turing, în cazul în care punem întrebări unei maşini şi nu ne putem da seama dacă răspunsurile vin de la un computer sau de la o altă fiinţă umană, atunci putem spune despre computer că e conştient.

Unii nu sunt de acord şi susţin că, deşi un computer poate simula în mod convingător că are conştiinţă, asta nu înseamnă că *este* conştient. Testul lui Turing atribuie conştiinţă doar în baza unei analogii. Dar nu tocmai asta facem tot timpul în relaţie cu alţi oameni? Descartes a formulat renumitul enunţ „Gândesc, deci exist". Dar, deşi îmi cunosc propriile gânduri, nu le pot cunoaşte pe ale tale fără să fiu tu. Aş putea deduce, prin analogie cu mine, că există o conştiinţă în corpul tău, dar nu pot fi niciodată sigur. Lucru valabil şi viceversa. Cel mai corect lucru pe care pot să-l spun e că „tu pari să gândeşti, deci pari să exişti". În filozofie, există o perspectivă numită solipsism, care neagă existenţa altor minţi. N-o voi urma aici pentru că dacă tu, cititorul, nu exişti, atunci nu vei fi interesat de argumentele mele în privinţa solipsismului, aşa că mi-aş pierde vremea.

Filozofii au încercat preţ de secole să lege lumea minţii cu cea a materiei, o dilemă numită uneori „problema minte–corp". Vreme de mii de ani, se credea în general că mintea sau conştiinţa e o trăsătură universală a tuturor lucrurilor. Cunoscută sub denumirea de panpsihism, această doctrină a avut mai multe variaţii, însă toate aveau în comun credinţa că mintea e răspândită în univers ca o calitate elementară: conştiinţa umană e doar o expresie, concentrată şi amplificată, a esenţei

---

* Care e şi titlul unui film recent despre viaţa lui Turing [*The Imitation Game*; titlul românesc: *Jocul codurilor* (*n. tr.*)].

Scanned with OKEN Scanner

mentale universale. În acest sens, panpsihismul are elemente comune cu vitalismul. Această perspectivă a supraviețuit până târziu în secolul XX: unele idei de acest gen le găsim, de exemplu, în psihologia lui Jung. Totuși, panpsihismul nu se prea potrivește cu neuroștiințele actuale, care pun accentul pe complexitatea electrochimică. În particular, funcțiile cerebrale superioare sunt asociate în mod clar cu organizarea colectivă a arhitecturii neuronale. Nu ar avea prea mult sens să spunem că fiecare neuron e „puțin" conștient, astfel încât o grupare numeroasă de neuroni e foarte conștientă. Conștiința apare numai atunci când milioane de neuroni sunt integrați într-o rețea complexă și bine interconectată. În creierul uman, o experiență conștientă e formată din mai multe componente prezente simultan. Dacă sunt conștient de, să spunem, un peisaj, experiența de moment a imaginii include informații vizuale și auditive din câmpul meu vizual, informații care sunt procesate în diferite regiuni ale creierului, sunt apoi integrate într-un întreg coerent și (cumva!) livrate „sinelui conștient" (orice ar însemna asta) sub formă de experiență holistică.

Toate aceste lucruri ne fac să ne întrebăm *unde anume* se află mintea? Răspunsul evident e: undeva între urechi. Însă, din nou, nu putem fi complet siguri. Multă vreme, sursa sentimentelor a fost considerată nu creierul, ci alte organe, cum ar fi intestinele, inima sau splina. Într-adevăr, urme ale acestei credințe străvechi au rămas în limbaj. Spunem despre oamenii triști că „își varsă amarul" sau ne referim la intuiție ca la o „senzație viscerală". În domeniul vieții sentimentale folosim frecvent termeni precum „îți dau inima" sau „am inima frântă". E puțin probabil ca expresii de genul „mi-ai cucerit creierul" (și cu atât mai puțin „mi-ai cucerit amigdala") să ne fie de folos când vrem „să cucerim inima" unei fete, chiar dacă ar fi mai corecte din punct de vedere științific.

Ca să punem o întrebare și mai radicală: cum putem ști sigur că sursa conștiinței se află în corpul nostru? Poate vă

Scanned with OKEN Scanner

gândiți că dacă o lovitură la cap aruncă pe cineva în stare de inconștiență, atunci „sediul conștiinței" trebuie să se afle în craniu. Dar nu există nici un motiv logic pentru care să tragem această concluzie. O lovitură puternică aplicată televizorului meu în timpul unui buletin de știri tulburător poate face să dispară imaginea, dar asta nu înseamnă că reporterul se află în televizor. Televizorul e doar un receptor: acțiunea reală se petrece într-un studio, la mulți kilometri distanță. Ar putea creierul să fie doar receptorul „semnalelor de conștiință" create altundeva? În Antarctica, de exemplu? (Nu e o întrebare serioasă, ci doar încerc să formulez un argument.) De fapt, ideea că „undeva" ar exista cineva sau ceva care „ne pune gânduri în cap" e destul de răspândită. Însuși Descartes a speculat în acest sens, imaginând un demon viclean care ne păcălește mintea. Astăzi, multă lume crede în telepatie. Așadar, ideea că mintea ar fi delocalizată nu e chiar atât de fantezistă. De fapt, unii oameni de știință distinși au cochetat cu ideea că nu tot ce ne apare în minte își are originea în propriul cap. O idee populară, chiar dacă întru câtva mistică, e aceea că sclipiri de inspirație matematică pot apărea atunci când mintea matematicianului „pătrunde" într-un tărâm platonic al formelor și relațiilor matematice ce nu se află doar dincolo de creier, ci și dincolo de spațiu și de timp.[5] Cosmologul Fred Hoyle a susținut la un moment dat o ipoteză și mai îndrăzneață: efectele cuantice din creier lasă loc posibilității ca în procesele noastre de gândire să pătrundă elemente externe care ne ghidează spre concepte științifice utile. Hoyle a afirmat că această „călăuză externă" ar putea fi o superinteligență din viitorul cosmic îndepărtat care folosește o proprietate a mecanicii cuantice ce permite inversarea curgerii timpului pentru a dirija progresul științific.[6] Chiar dacă nu luăm în seamă astfel de idei extreme, mințile extinse ar putea deveni o normă în viitor. Oamenii s-ar putea bucura de o inteligență îmbunătățită prin externalizarea unei părți din activitatea mentală în aparate de calcul puternice

Scanned with OKEN Scanner

cuplate la creier prin wi-fi, transformând astfel creierul în, pe de-o parte, receptor de conștiință, și, pe de alta, în generator de conștiință.

O versiune extremă a teoriei potrivit căreia gândurile sunt generate în afara creierului e argumentul simulării, acum devenit la modă printre unii filozofi și popularizat de filme precum *The Matrix*. Conform acestei idei, ceea ce considerăm a fi „lumea reală" este, de fapt, o lume virtuală creată într-un computer foarte puternic din lumea reală. Astfel, noi, oamenii, suntem module de conștiință simulată.* Nu se poate spune nimic despre simulatori (cine sau ce sunt) pentru că noi, bietele simulări, suntem prinși în sistem și nu putem avea niciodată acces la lumea reală. În lumea noastră simulată și falsă, avem un corp simulat cu un creier simulat, însă gândurile, senzațiile, sentimentele etc. care se manifestă odată cu conștiința nu se nasc deloc în creierul fals, ci în sistemul de simulare dintr-un alt plan al existenței.

E amuzant să speculăm pe baza unor astfel de scenarii, dar, de aici înainte, mă voi limita la perspectiva conservatoare conform căreia conștiința este, de fapt, produsă cumva în creier și mă voi întreba ce fel de procese fizice o pot crea. Nu fiți dezamăgiți de acest plan limitat: mai există o sumedenie de probleme dificile cu care să ne confruntăm.

Mintea și materia

Nici măcar non-solipsiștii (cei care acceptă că alți oameni sunt conștienți) nu se pot pune de acord care organisme *non*-umane sunt conștiente. Cei mai mulți par mulțumiți să presupună că animalele lor de companie au minte, dar dacă e să coborâm pe

* „Computer" e un cuvânt nefericit în contextul de față, pentru că e aproape sigur că aparatele pe care astăzi le numim computere nu ar putea simula conștiința.

Scanned with OKEN Scanner

arborele vieții către trunchiul său primitiv nu întâlnim nici o graniță clară, nici un indiciu oferit de comportament care să ne spună că există vreo conștiință. Este șoarecele conștient? Sau musca? Sau furnica? Sau bacteria? Dacă vrem să argumentăm prin analogie, o trăsătură importantă a conștiinței e conștientizarea mediului înconjurător însoțită de capacitatea de a reacționa în mod corespunzător la schimbări. Ei bine, bacteriile se îndreaptă spre mâncare cu ceea ce pare a fi un plan intenționat. Însă e greu să ne imaginăm că bacteria ar putea „simți foame" la fel ca noi. Dar cine poate ști?

Uneori se aduce în discuție anatomia creierului. E limpede că majoritatea activităților creierului și sistemului nervos asociat sunt realizate în mod inconștient. Funcțiile de bază (procesarea semnalelor senzoriale, memoria, controlarea activității motorii, bătăile inimii) sunt realizate fără să ne dăm seama. Multe regiuni cerebrale funcționează fără probleme când ne pierdem cunoștința (de exemplu, în timpul somnului profund sau când suntem anesteziați), ceea ce sugerează că nu tot creierul e conștient sau, mai exact, că generarea conștiinței e o funcție limitată la o singură parte a creierului, deseori considerată a fi regiunea numită corticotalamus. Însă e greu să determinăm exact ce proprietăți are o regiune pe care alte părți inconștiente, dar incredibil de complexe, nu o posedă. În plus, unele animale care prezintă comportament inteligent, precum păsările, au o anatomie a creierului foarte diferit organizată, astfel încât ori conștiința și inteligența nu merg mână în mână, ori e greșit să atribuim conștiință unei anumite regiuni din creier.

Un lucru e dincolo de orice dubiu: creierul procesează informație. Prin urmare, e tentant să căutăm „sursa conștiinței" în tiparele de informație care ni se învârt prin cap. Specialiștii în neuroștiințe au făcut progrese enorme în cartografierea proceselor cerebrale când subiectul experimentează cutare sau cutare senzație, emoție ori stimul senzorial. Nu-i ușor. Creierul

Scanned with OKEN Scanner

omenesc conține 100 de miliarde de neuroni (cam câte stele sunt în galaxie), iar fiecare neuron se conectează cu sute sau poate chiar cu mii de alți neuroni pentru a forma o rețea vastă de flux informațional. Miliarde de neuroni cu activare rapidă trimit cascade elaborate de semnale electrochimice ce se împrăștie în toată rețeaua. Cumva, din această învălmășeală electrică apare conștiința.

Reducând problema la elementele fundamentale, vrem să aflăm răspunsurile la următoarele întrebări:

1. *Ce fel de procese fizice generează conștiință?* Asta a fost întrebarea lui Schrödinger. De exemplu, tiparele electrice care apar în creier par să aibă acest rol, dar cum rămâne cu tiparele electrice din rețeaua electrică națională? Dacă răspundem afirmativ în primul caz, dar nu și în cel de-al doilea, atunci ne punem problema dacă totul se reduce la *tipare*, și nu la electricitate ca atare. Există oare un prag de complexitate, astfel încât creierul e suficient de complex, dar rețeaua de curent nu? Iar dacă importante sunt tiparele, este oare nevoie de electricitate, sau ar funcționa orice fel de tipar schimbător? Ar putea fi tot atât de valabil tiparul lichidelor turbulente sau cel al ciclurilor chimice întrepătrunse? Altfel spus, să fie oare nevoie de un alt ingredient, pe care l-am putea numi teoria „electricitate plus" a conștiinței? Dacă da, ce presupune acel „plus"? Nimeni nu știe.
2. *Dat fiind că mintea există, cum poate aceasta să influențeze lumea fizică?* Cum se conectează mintea la materie astfel încât să dobândească putere cauzală asupra lucrurilor materiale? Aceasta e vechea problemă a relației dintre minte și corp. Dacă aleg să-mi mișc brațul și brațul se mișcă, ceva din universul fizic s-a schimbat (poziția brațului meu). Dar cum se întâmplă asta? Cum e tradusă „alegerea" sau „hotărârea" în mișcări ale atomilor? N-are rost să-mi spuneți că dorința de a-mi mișca brațul nu reprezintă nimic altceva decât tipare

Scanned with OKEN Scanner

electrice care activează apoi semnale electrice ce călătoresc prin nervi până la braţ şi provoacă o contracţie a muşchilor, pentru că nu aţi face decât să explicaţi misterul 2 apelând la misterul 1.

În descrierea mea se ascunde o premisă presupusă de discuţiile despre conştiinţă, şi anume că există un agent sau o persoană sau o entitate care „posedă" conştiinţă. O minte „aparţine" cuiva. Mă refer, bineînţeles, la conştiinţa de sine. În sens strict, trebuie să facem distincţia între a fi conştient de lume şi a fi conştient de sine. Poate că o muscă e conştientă de lume, dar nu şi de existenţa sa ca agent. Însă oamenii au fără îndoială o conştiinţă profundă de sine,* de faptul că sunt un fel de „fantomă într-o maşină". Indiferent de dezavantajele filozofie ale unui astfel de dualism, pare corect să spunem că aproape toată lumea consideră că mintea e ceva real. Dar ce e mintea? Nu e o substanţă materială sau eterică. Să fie informaţie? Nu orice fel de informaţie, ci tipare de informaţie foarte specifice ce se manifestă în creier. Pare evident că fluxul de informaţie dintr-un circuit neuronal creează cumva conştiinţă, însă o explicaţie completă a minţii trebuie să meargă mult mai departe. Dacă baza informaţională a minţii e corectă, atunci mintea există în acelaşi sens în care există informaţia. Însă nu putem deconecta mintea de materie. După cum ne spunea Rolf Landauer, „informaţia e fizică", prin urmare minţile trebuie obligatoriu să fie şi ele legate de fenomenele materiale din creier.

Dar *cum*?

---

* Experimentele psihologice ne spun că abia pe la vârsta de doi ani dezvoltăm o conştiinţă de sine completă.

Scanned with OKEN Scanner

Curgerea timpului

Trecutul, prezentul şi viitorul sunt doar iluzii.
—Albert Einstein[7]

Un indiciu al legăturii dintre informaţia neuronală şi conştiinţă provine din cel mai elementar aspect al experienţei umane: felul în care simţim curgerea timpului. Chiar şi atunci când sunt privaţi de simţuri, oamenii păstrează conştiinţa de sine şi cea a continuităţii propriei existenţe, astfel încât trecerea timpului constituie o parte importantă a faptului că suntem conştienţi de noi înşine. În capitolul 2, am vorbit despre o săgeată a timpului a cărei origine poate fi găsită în a doua lege a termodinamicii şi, până la urmă, în condiţiile iniţiale ale universului. Aici nu există nici un dubiu. Însă mulţi confundă săgeata fizică a timpului cu sentimentul psihologic al *curgerii* timpului. Articolele de popularizare a ştiinţei folosesc deseori expresii precum „timpul curge înainte“ sau vorbesc despre posibilitatea ca „timpul să meargă în sens invers“.

E limpede că procesele cotidiene posedă o direcţionalitate temporală intrinsecă, astfel încât dacă am fi martori la o inversare a evenimentelor (ouă care se reconstituie după ce s-au spart sau gaze care se separă de unele singure) am rămâne cu gura căscată. Observaţi că sunt atent să descriu secvenţele stărilor fizice *în* timp, însă metoda standard de a-l discuta o constituie referirea la o săgeată *a* timpului. Aceste formulări sunt extrem de înşelătoare. Săgeata nu e o proprietate a *timpului însuşi*. Din acest punct de vedere, timpul nu e prea diferit de spaţiu. Gândiţi-vă la rotaţia Pământului, care descrie şi o asimetrie (între nord şi sud). Uneori, indicăm acest lucru tot cu o săgeată: acul unei busole arată nordul, iar pe hărţi obişnuim să reprezentăm nordul printr-o săgeată care arată în sus. Nici prin gând nu ne-ar trece însă să spunem că asimetria nord–sud a Pământului (sau săgeata de pe o hartă) ar fi „o săgeată a spa-

Scanned with OKEN Scanner

ţiului". Spaţiului nu-i pasă deloc de rotirea Pământului ori de nord sau de sud. Tot aşa, timpului nu-i pasă deloc de ouă care s-ar sparge sau s-ar recompune ori de gaze care s-ar amesteca sau s-ar separa la loc.

Ideea des întâlnită potrivit căreia senzaţia *curgerii* timpului este „săgeata timpului" confundă două metafore distincte. Prima e folosirea unei săgeţi pentru a indica orientarea spaţială (precum acul unei busole), iar a doua e o analogie cu o săgeată în zbor care simbolizează mişcare direcţionată. Când arată nordul, săgeata unei busole nu indică faptul că ne *mişcăm* spre nord. Tot aşa, e în regulă să ataşăm o săgeată unei secvenţe de evenimente din lume pentru a distinge trecutul de viitor în cadrul secvenţei, dar nu e bine (de fapt, e absurd) să spunem apoi că această săgeată a asimetriei presupune o *mişcare* către viitor de-a lungul desfăşurării evenimentelor, adică o mişcare *a* timpului.

Argumentul meu e întărit de observarea faptului că presupusa trecere a timpului nu poate fi măsurată. *Nu există nici un instrument de laborator care să detecteze curgerea timpului.* Stai aşa, v-aţi putea gândi, oare ceasurile nu măsoară trecerea timpului? De fapt, nu. Un ceas măsoară *intervalele* de timp dintre evenimente, şi face asta corelând poziţiile braţelor cu o stare din lume (de exemplu, poziţia unei mingi sau starea mintală a unui observator). Descrierile informale de genul „gravitaţia încetineşte timpul" şi „timpul curge mai repede în spaţiu decât pe Pământ" înseamnă, de fapt, doar că braţele ceasurilor din spaţiu se rotesc mai încet în raport cu braţele unor ceasuri identice de pe Pământ. (Chiar aşa e. Testul e uşor: comparaţi afişajele ceasurilor.) Cea mai abuzivă terminologie dintre toate e discuţia despre „timpul care merge în sens invers". Timpul nu „merge" deloc. O exprimare corectă din punct de vedere fizic e posibila inversare în timp (care rămâne neschimbat) a secvenţei direcţionale normale a unor stări fizice: de exemplu, mormane de dărâmături care s-ar reasambla în clădiri în timpul

Scanned with OKEN Scanner

unui cutremur, demonii lui Maxwell creând ordine din haos. Nu timpul în sine „merge în sens invers", ci *secvența stărilor.*

În orice caz, e limpede că timpul nu se poate mișca. Mișcarea descrie schimbarea stării unui lucru (de exemplu, poziția unei mingi) de la un moment temporal la altul. Timpul în sine s-ar putea „mișca" doar dacă ar exista o a doua dimensiune temporală prin raportare la care se poate evalua mișcarea sa. Până la urmă, ce răspuns poate exista la întrebarea „Cât de repede trece timpul?" Viteza trebuie să fie „secundă după secundă", ceea ce e o tautologie. Dacă nu sunteți convinși, încercați să răspundeți la întrebarea: „Cum ne-am putea da seama dacă viteza de trecere a timpului s-ar schimba?" Ce s-ar observa diferit în lume dacă timpul s-ar mișca mai repede sau mai încet? Dacă v-ați trezi mâine și viteza timpului s-ar dubla, odată cu ritmul proceselor voastre mentale, atunci nimic n-ar părea schimbat, din același motiv pentru care, dacă v-ați trezi și toate lucrurile din lume, inclusiv voi înșivă, ar fi de două ori mai mari, nimic nu ar arăta diferit față de acum. În concluzie, „curgerea timpului" nu are sens ca flux propriu-zis.

Deși argumentele anterioare au fost aduse de filozofi de mai bine de un secol, metafora curgerii timpului este atât de puternică încât e foarte greu să vorbim normal fără să cădem în capcana sa. Greu, dar nu imposibil. Fiecare afirmație despre lume care face referire la trecerea timpului poate fi înlocuită cu o afirmație mai greoaie care nu se referă deloc la trecerea timpului, ci doar corelează stări ale lumii din diferite momente cu stări ale creierului/minții din aceleași momente. Să luăm ca exemplu afirmația: „Am urmărit cu nerăbdare și încântare cum soarele a apus deasupra oceanului la ora 18". Aceleași fapte observabile pot fi comunicate prin următoarea afirmație mai complicată: „Configurația ceasului care arată 17:50 e corelată cu poziția soarelui deasupra orizontului și cu o stare de nerăbdare în creierul/mintea observatorilor. Configurația ceasului care arată 18:10 e corelată cu poziția soarelui

Scanned with OKEN Scanner

sub linia orizontului și cu o stare de încântare în creierul/mintea observatorilor". Referirea la curgerea sau trecerea timpului ne este indispensabilă în viața de zi cu zi, dar nu are sens când e raportată la fizica timpului însuși.

Nu încape îndoială că avem puternica impresie *psihică* că propria conștiință ne este purtată de curentul de neoprit al timpului, context în care e perfect legitim să căutăm o explicație științifică pentru *senzația* trecerii timpului. Explicația pentru acest flux psihologic familiar se găsește, după părerea mea, în neuroștiințe, nu în fizică. Putem face o analogie destul de bună cu senzația de amețeală. Rotiți-vă în loc de câteva ori, apoi opriți-vă brusc: veți rămâne cu senzația că lumea se învârte în jurul vostru, chiar dacă, bineînțeles, nu o face. Originea fenomenului se află în procesele de la nivelul urechii interne și al creierului: impresia că totul se învârte e o iluzie. Tot așa, senzația mișcării timpului e o iluzie, probabil legată cumva de felul în care amintirile sunt organizate în creier.

În concluzie: timpul nu trece (sper să-l fi convins pe cititor!).

Ei bine, atunci ce trece? Voi argumenta că ceea ce se schimbă de la o clipă la alta este conștiința sinelui trecător. Ideea greșită că timpul curge sau trece își are originea în supoziția tacită a unui sine *conservat*. E firesc să credem că „noi" rămânem la fel de la o clipă la alta în timp ce lumea se schimbă odată cu „trecerea timpului". Dar, așa cum a remarcat Alice în povestea lui Lewis Carroll, „n-are rost să vă vorbesc de ziua de ieri, căci ieri eram altă persoană".[8] Alice avea dreptate: „tu" nu mai ești azi la fel cum erai ieri. Sigur, există o corelație strânsă (multă informație împărtășită, ca să folosim termeni tehnici) între tu de azi și tu de ieri: un fir de informație alcătuit din amintiri, credințe, dorințe, atitudini și alte lucruri care în general se schimbă lent și care ne dau impresia de continuitate. Însă continuitatea nu înseamnă conservare. Există un tu în viitor corelat cu (adică observând) stări viitoare ale lumii, tot așa cum există un tu în trecut corelat cu (observând) stări trecute

Scanned with OKEN Scanner

ale lumii. În fiecare moment, acel tu corespunzător acelei stări a lumii interpretează corelația cu respectiva stare ca fiind „acum". Pentru „acel tu", „acel moment" chiar înseamnă „acum". Asta-i tot!

Fenomenul trecerii timpului ne arată că „sinele" este un tipar complex de informație stocată ce evoluează încet, poate fi accesat la momente de timp ulterioare și furnizează un model informațional cu care sunt potrivite percepțiile noi. Iluzia fluxului temporal provine din micile și inevitabilele nepotriviri.

Demonii din circuite

Cam atât despre subtilul sine. Dar cum rămâne cu creierul? Aici suntem pe un teren mai sigur. Chiar și la o primă vedere, e limpede că avem de-a face cu un centru efervescent de activitate electrochimică. Mai întâi, câteva statistici uluitoare. Să ne amintim că în creierul uman există aproximativ 100 de miliarde de neuroni. Aceste celule nervoase sunt centre de procesare a informației.[9] Fiecare are o fibră numită axon, ce poate ajunge până la un metru sau mai mult. Axonii leagă neuronii între ei și formează o rețea foarte densă. Fiecare neuron poate stabili legături cu până la 10.000 de alți neuroni. Axonii se pot ramifica de sute de ori. Un axon nu se lipește direct la o altă celulă. Neuronii sunt prevăzuți cu dendrite, astfel încât axonii se prind de una dintre ele. Alți axoni se pot prinde de alte dendrite ale aceluiași neuron, putându-se astfel combina semnalele de intrare de la mai mulți axoni în același timp. S-a estimat că în creierul uman s-ar putea stabili până la 10 trilioane de conexiuni în total, un nivel uluitor de complexitate. Neuronii se pot „activa" (trimit pulsuri prin axoni) cu o viteză frenetică: poate de 50 de ori pe secundă. Asta înseamnă că în creier se pot executa cam 10^{15} operațiuni logice pe secundă, mai rapid decât cel mai rapid supercomputer din lume.

Scanned with OKEN Scanner

Cel mai frapant e faptul că un supercomputer generează mulți megawați de căldură, în vreme ce creierul face toate aceste lucruri degajând aceeași cantitate de căldură precum un bec de mică putere! (Pe cât de impresionant e, creierul tot operează cu multe ordine de mărime deasupra limitei Landauer – vezi pagina 65)

Creierul e comparat deseori cu un circuit electric și e adevărat că funcționează pe baza unui flux de electricitate. Însă, cu toate că semnalele electrice dintr-un computer (sau din rețeaua electrică) sunt formate din electroni care se deplasează de-a lungul unor fire, corespondentul lor din creier (axonii) funcționează foarte diferit. Pe toată membrana exterioară a axonului există mici orificii care se pot deschide și închide pentru a permite trecerea unei singure particule, un mecanism foarte asemănător cu obturatorul manevrat de demonul lui Maxwell.[10] În acest caz, proteinele specializate aleg diferiți ioni (atomi cu sarcină) în locul moleculelor. Orificiile sunt, de fapt, tuburi înguste numite „canale ionice tensio-dependente": ele pot deschide și închide o poartă pentru a permite accesul ionilor necesari, blocându-i afară pe cei nepotriviți. Iată cum creează acest mecanism un semnal electric care se propagă de-a lungul axonului: când neuronul e inert, axonul are o sarcină negativă înăuntru și o sarcină pozitivă în exterior, creând o mică diferență de potențial (sau polaritate) pe cuprinsul membranei. Membrana în sine are rol izolator. Ca reacție la sosirea semnalului din corpul neuronului, poarta se deschide și permite ionilor de sodiu să curgă din afară înăuntru, inversând astfel diferența de potențial. Apoi, un alt grup de canale de ioni se deschide pentru a permite ionilor de *potasiu* să curgă în sens opus (din interior spre exterior), revenind la voltajul inițial. Inversarea polarității durează în general doar câteva miimi de secundă. Această perturbare trecătoare activează același proces într-o porțiune adiacentă din membrana axonului, care la rândul ei declanșează următoarea porțiune și tot așa.

Scanned with OKEN Scanner

Astfel, semnalul se propagă de-a lungul axonului către un alt neuron. Prin urmare, chiar dacă neuronii își trimit semnale electrice, acest lucru se petrece cu ajutorul unei unde de polaritate, și nu printr-un flux de curent electric propriu-zis.

Pentru a realiza această performanță, proteinele au nevoie de o capacitate uluitoare de diferențiere. Trebuie mai ales să facă diferența între ionii de sodiu și cei de potasiu (ionii de potasiu sunt doar cu foarte puțin mai mari), astfel încât să-l lase doar pe cel corect să meargă în sensul corespunzător. Proteinele se lipesc de-a lungul membranei și formează un tunel către exteriorul axonului cu ajutorul unui canal interior. Canalul e suficient de îngust încât să permită unui singur ion să-l traverseze. Câmpurile electrice create de proteinele polarizate electric eficientizează procesul la maximum. Ionii trec cu foarte puțin efort, iar curenții tipici au un debit de milioane de ioni pe secundă când canalul e deschis. Precizia de sortare e foarte ridicată: mai puțin de un ion din o mie e greșit. Pentru a stabili când se deschid și se închid porțile, grupurile de proteine au senzori care detectează schimbările din potențialul membranei pe măsură ce se apropie unda de polaritate.

Rezultatul acestei activități demonice e acela că pulsurile de curent electric se deplasează de-a lungul axonilor în grupuri sau „trenuri" până ajung la un alt neuron (uneori un alt axon), stimulându-i sau inhibându-i activitatea. Neuronii nu sunt doar pasivi, predând ștafeta semnalului către următorul neuron din șir, ci au o structură internă care joacă un rol fundamental în procesarea semnalului. Mai precis, axonii sunt separați de dendritele pe care se prind prin spații de circa 20 de nanometri numite sinapse, peste care semnalul poate sări dacă sunt îndeplinite condițiile potrivite. Puntea peste această „fantă sinaptică" e formată nu din curent electric propriu-zis, ci dintr-o varietate mare de molecule numite neurotransmițători. Unele dintre ele, cum ar fi serotonina și dopamina, ne sunt cunoscute, iar altele, mai puțin. Moleculele sunt eliberate

Scanned with OKEN Scanner

de mici vezicule (ca niște minicelule învelite într-o membrană) și se împrăștie în fantă, unde se leagă de receptorii de cealaltă parte. În urma acestei legături create, în corpul neuronului-țintă sunt inițiate schimbări electrice. De exemplu, în starea de repaus, neuronul va avea o diferență negativă de potențial față de exterior de aproximativ 70 de milivolți, menținută prin pomparea ionilor prin membrana celulară. Legarea neurotransmițătorilor poate face membrana să permită trecerea ionilor (sodiu, potasiu, clor) pentru a modifica diferența de potențial. Dacă voltajul scade sub un anumit prag (adică dacă interiorul celulei e mai puțin negativ), atunci neuronul se va activa, trimițând un puls de-a lungul axonului către alți neuroni și așa mai departe. Unii neurotransmițători declanșează o *creștere* a voltajului din membrană (dând interiorului celulei un potențial tot mai negativ), ceea ce inhibă activarea. Cum semnalele venite de la mai mulți neuroni se pot amesteca, sistemul acționează mai degrabă ca un circuit logic, în care neuronul e fie pornit (activat), fie oprit (dezactivat), în funcție de starea combinării și de semnalele primite.

Dar ce putem spune despre arhitectura circuitului? Multe detalii rămân încă necunoscute, însă circuitul neuronal nu e static, ci se schimbă odată cu experiențele individului. Noile amintiri, de exemplu, se întipăresc prin reorganizarea activă a circuitului. Astfel, un bebeluș nu se naște cu o „schemă a circuitului" fixă, ci cu un desiș de interconexiuni care pot fi restructurate și rearanjate în timpul procesului de creștere și învățare.

Cum să construim un contor al minții

Conștiința e un produs emergent și colectiv al unui întreg organizat: cum o putem înțelege în termeni de informație? Este perfect logic să spunem că fiecare neuron procesează câțiva biți de informație și că un grup de mulți neuroni procesează

Scanned with OKEN Scanner

mult mai mult, însă tratarea informației din punct de vedere aritmetic (o numărătoare a biților adunați laolaltă) nu e decât o altă formă de panpsihism. Acest lucru nu explică capacitatea esențială a informației dintr-o zonă extinsă a creierului de a se *integra* într-un întreg. Giulio Tononi și colaboratorii săi de la Universitatea din Madison, Wisconsin, au încercat să definească un tip de „informație integrată" ca măsură a conștiinței. Ideea cercetării lor era să surprindă în termeni matematici preciși noțiunea intuitivă că, atunci când vine vorba de creier, întregul e mai mare decât suma părților.

Conceptul de informație integrată devine foarte limpede când îl aplicăm în cadrul unor rețele. Închipuiți-vă o cutie neagră cu terminale input și output. Înăuntru există elemente electronice, precum o rețea cu elemente logice (ȘI, SAU etc.) conectate între ele. Dacă o privim din exterior, nu vom putea în general să deducem schema circuitului doar examinând relația cauză–efect dintre input și output, pentru că mai multe cutii negre identice din punct de vedere funcțional pot fi construite din circuite foarte diferite. Dar e cu totul altceva dacă deschidem cutia. Să presupunem că tăiem cu un clește câteva fire din rețea, apoi activăm din nou sistemul cu tot felul inputuri. Dacă intervenția noastră modifică drastic rezultatele, putem spune despre circuit că e foarte integrat, în timp ce într-un circuit slab integrat efectul celor câteva fire tăiate e insesizabil. Ca să dăm un exemplu banal, să presupunem că în cutie există două circuite separate și independente, fiecare având propriile terminale de input și output. Poate că există anumite fire care interconectează cele două circuite și care sunt complet redundante din cauza faptului că nici un semnal nu trece vreodată prin ele. Aceste fire pot fi tăiate fără grijă.*

---

* Mi se pare corect să spunem că dacă o rețea neuronală se *dezintegrează* (prin tăieri continue) va înceta cu totul să mai gândească. Formula lui Giulio Tononi pentru măsurarea conștiinței adoptă această idee fun-

Scanned with OKEN Scanner

Tononi și colegii săi au stabilit o metodă de a calcula interconectivitatea ireductibilă a unui circuit general prin examinarea tuturor descompunerilor posibile ale circuitului în fragmente, ceea ce ne-ar permite să ne dăm seama câtă informație s-ar pierde. Circuitele foarte integrate pierd multă informație în urma operațiunii. Gradul de integrare calculat astfel e notat cu litera grecească Φ. Conform lui Tononi, sistemele cu o valoare mare a lui Φ, cum e creierul, sunt (dintr-un anumit punct de vedere) „mai conștiente" decât sistemele cu un Φ mic, cum e un termostat. Aș spune că definiția exactă a lui Φ e foarte tehnică; nu o voi discuta aici.[11] În termeni generali, dacă elementele din cutie își constrâng reciproc activitatea, atunci Φ este mare; lucru valabil atunci când există multe bucle de feedback și transfer de informație prin interconectivitate. Dar dacă sistemul implică un flux ordonat de informație unidirecțională de la input la output (un sistem feedforward), atunci Φ = 0: ceea ce din afara cutiei negre poate părea un sistem unitar este, de fapt, doar o conjuncție de procese independente. Biologia preferă sistemele integrate (creierul fiind exemplul suprem) pentru că sunt mai economice din punctul de vedere al elementelor și conexiunilor și mai flexibile decât sistemele echivalente funcțional care au o arhitectură doar feedforward. Larissa Albantakis, membră a grupului lui Tononi, susține că apariția *autonomiei* la un organism viu (sau la un robot) merge mână în mână cu o valoare ridicată a lui Φ: „Pentru a fi o entitate autonomă cauzal din perspectivă intrinsecă e nevoie de o structură cauză–efect integrată; simpla «procesare» a informației nu e suficientă".[12] Și ne așteaptă câteva surprize. Cercetătorii au descoperit că, folosindu-l pe Φ drept măsură a conștiinței, „unele sisteme simple pot fi minim conștiente, unele sisteme complicate pot fi inconștiente, iar două sisteme

damentală. Cu toate astea, e posibil să existe alte formule care ar funcționa mai bine.

Scanned with OKEN Scanner

diferite pot fi echivalente funcțional, însă numai unul e conștient".[13]

Dacă cititorul s-a pierdut în termeni tehnici, dați-mi voie să propun o analogie. Închipuiți-vă un comitet format din 20 de membri însărcinați cu misiunea secretă de a decerna Premiul Smith pentru Excelență Științifică în fiecare an. Datele de input ale comitetului sunt reprezentate de lista celor nominalizați și a documentelor relevante; output-ul e numele câștigătorului. Pentru public, comitetul arată ca o „cutie neagră": pe o parte intră nominalizările și pe cealaltă iese o recomandare („comitetul a decis"). Dar acum haideți să privim din perspectivă internă. Dacă membrii sunt independenți și votează fără să se consulte, comitetul nu e integrat: are $\Phi = 0$. Dar să presupuneam că există facțiuni: un grup susține discriminarea pozitivă, un altul consideră că premiul a ajuns la prea mulți chimiști de-a lungul timpului și tot așa. Din pricina afilierii la diverse grupuri, acești membri își constrâng deciziile unii altora. Un oarecare nivel de integrare e dat de „interconexiunile" din cadrul fiecărei facțiuni. În plus, dacă există discuții ample în interiorul comitetului (mult feedback și multă interconectivitate) și apoi e luată o decizie în unanimitate, atunci Φ capătă valoare maximă. În cazul în care unul dintre membrii comitetului e stenograful de serviciu, care consemnează desfășurarea procedurii, dar nu e implicat în discuție, comitetul are o valoare a lui Φ mai mică pentru că nu e complet integrat.

În mod inevitabil, în urma identificării informației integrate cu conștiința apar multe probleme fără soluții, una dintre cele mai importante fiind măsura în care funcția neuronală este echivalentă cu activitățile circuitelor logice. Deși comparațiile cu computerele sunt frecvente, cei mai mulți specialiști în neuroștiințe nu consideră creierul un computer digital extrem de puternic. Sigur, creierul procesează informații, dar în baza unor principii foarte diferite față de cele ale PC-ului pe

Scanned with OKEN Scanner

care tastez aceste cuvinte. Nu e clar nici măcar dacă *digitalul* e calea de urmat. Multe funcții neuronale pot opera mai degrabă ca un computer analog. În orice caz, informația integrată e o tentativă lăudabilă de a înțelege conștiința în mod cantitativ și de a oferi un fundament teoretic bazat pe cauzalitate și pe fluxul informației.

Liberul-arbitru și capacitatea de a acționa

Iarăși și iarăși îți spun, au atomii abateri mărunte.
—Titus Lucretius Carus[14]

O proprietate familiară a conștiinței umane e sentimentul de libertate: senzația că avem viitorul cumva deschis, că putem să ne determinăm destinul, supunând istoria propriei voințe. Libertatea înseamnă că puteți să nu citiți acest capitol dacă nu vreți (sper că nu se va întâmpla asta). Pe scurt, oamenii se comportă asemenea unor agenți.

Acum un secol, liberul-arbitru părea gata să intre în conflict cu știința. Creierul e alcătuit din atomi, iar atomii trebuie să facă ce trebuie atomii să facă, adică să se supună legilor fizicii. Pentru a putea influența viitorul prin schimbarea activității din creierul nostru (dictându-ne, astfel, acțiunile), mintea ar trebui să exercite forțe fizice de așa natură încât, în termeni rudimentari, un atom din creier care se mișcă liniștit spre stânga să cotească brusc spre dreapta. Această dilemă e cunoscută din Antichitate și a fost numită „abatere" a atomilor de către Lucrețiu. Un univers determinist și mecanicist nu poate conține liber-arbitru. Viitorul e determinat în totalitate de starea de azi a universului, chiar până la nivelul creierului, al neuronilor și chiar al atomilor din creier. Dacă lumea e un sistem mecanic închis, atunci invocarea unui rol fizic al minții e inutilă, deoarece ar presupune *supradeterminism*.

Scanned with OKEN Scanner

Aceasta era situația la sfârșitul secolului al XIX-lea. Apoi a apărut mecanica cuantică, cu incertitudinea ei inerentă. În condiții prielnice, un atom care se deplasează spre stânga poate coti la dreapta de unul singur datorită stranietății cuantice. În anii '30, părea că indeterminismul cuantic va putea salva liber-arbitru. Însă nu e chiar așa de simplu. Pentru a avea liber-arbitru nu ne dorim indeterminism: vrem ca acțiunile să ne fie *determinate* de propria voință. Așa că a fost propusă o idee mai subtilă. Poate conștiința afectează indirect atomii „măsluind zarurile cuantice", astfel încât, chiar dacă atomii tind să aibă un comportament capricios, s-ar putea strecura ici și colo câte un ghiont sau câte o influență. Astfel, mintea ar accesa lumea fizică, izbutind să-și croiască drum pe ascuns în interstițiile cuantice ale lanțului cauzal. Din păcate, chiar și această strecurare ar însemna o încălcare a legilor mecanicii cuantice în sens statistic. Fizica cuantică poate permite incertitudine, dar nu implică anarhie. Mecanica cuantică presupune reguli probabilistice foarte precise, echivalentul „zarurilor corecte". Zarurile măsluite de minte ar încălca regulile cuantice.

Ce alte argumente mai există? Oamenii de știință și filozofii s-au confruntat de multă vreme cu problema reconcilierii capacității de a acționa cu comportamentul subiacent al atomilor și moleculelor din care e alcătuit agentul. Agentul nu trebuie să fie complicat ca o ființă umană rațională, ci poate fi o bacterie care caută hrană. Încă există o ruptură între comportamentul intenționat al agentului și activitățile oarbe ale componentelor agentului. Cum poate scopul (sau, dacă vă sperie acest cuvânt, „comportamentul orientat spre un obiectiv") să apară din atomi și molecule cărora nu le pasă de obiective?

Teoria informației ne-ar putea oferi răspunsul. Primul lucru pe care trebuie să-l observăm e că agenții nu sunt sisteme închise. Însuși fenomenul capacității de acțiune presupune reacții la schimbări din mediul sistemului. Organismele vii sunt, bineînțeles, conectate la mediul lor în diverse moduri, așa cum

Scanned with OKEN Scanner

m-am străduit să arăt în capitolele anterioare. Însă până și agenții neînsuflețiți (de exemplu, roboții) sunt programați să strângă informație din jur, s-o proceseze și să reacționeze la nivel fizic. Un sistem cu adevărat închis nu ar putea acționa (în mod unitar) ca un agent. Astfel, găsim o portiță în problema supradeterminismului. Există loc pentru narațiuni paralele, una la nivel atomic și cealaltă la nivelul agentului, fără a se contrazice reciproc, *câtă vreme sistemul este deschis.*

Să luăm ca exemplu creierul uman, care e împărțit în mai multe regiuni (emisfera stângă și cea dreaptă, talamusul, cortexul, amigdala etc.). În cadrul structurii generale, nu toți neuronii sunt la fel. În schimb, sunt organizați în diferite module și grupuri conform diferitelor lor funcții. O unitate larg definită e o „coloană corticală", un modul ce constă în câteva mii de neuroni cu proprietăți similare care pot fi tratați drept o unică populație. De exemplu, specialiștii în neuroștiință tratează coloanele corticale ca pe unități individuale atunci când studiază relațiile stimul–răspuns. O regiune bine cartografiată a creierului este cea corespondentă simțului tactil de la suprafața pielii. Neuronii conectați la degetul mare se află în apropierea celor prinși de degetul arătător, de pildă. Dacă cineva ne înțeapă în degetul mare, un modul de neuroni „se aprinde" în acea regiune a creierului și poate iniția un răspuns motor (ați putea spune „Au!"). Un neurolog poate descrie acest scenariu în termeni de cauză și efect, considerând „modulul deget mare" agent unitar simplificat.

Toată lumea e de acord că, din punct de vedere practic, este logic să discutăm despre module de nivel superior când explicăm activitatea creierului, și să nu apelăm la o descriere neînchipuit de complicată a fiecărui neuron. Însă teoria informației integrate a lui Tononi arată nu doar că descrierea de nivel superior e mai simplă, ci și că sistemele superioare chiar pot procesa *mai multă* informație decât componentele lor. Această afirmație contraintuitivă a fost cercetată de Erik Hoel, fost

Scanned with OKEN Scanner

membru al grupului de cercetare al lui Tononi care lucrează acum la Columbia University. Hoel a efectuat o analiză matematică destul de generală pentru a investiga efectele agregării variabilelor microscopice (de exemplu, prin metoda cutiei negre – vezi pagina 248), folosind așa-numita „teorie a informației efective".[15] Acesta și-a propus să descopere cum agenții, cu intențiile și comportamentele lor orientate spre obiective, pot apărea din fizica microscopică subiacentă căreia îi lipsesc aceste proprietăți. Concluzia a fost că pot exista relații cauzale *doar la nivelul agenților*. Contrar perspectivei reducționiste, stările macroscopice ale unui sistem fizic (cum ar fi starea psihologică a unui agent) care ignoră trăsăturile specifice interne de la scară mică pot avea putere cauzală *mai mare* decât o descriere mai detaliată a sistemului, un rezultat bine rezumat prin dictonul „macro poate înfrânge micro".

În ciuda acestor analize amănunțite, un reducționist încăpățânat ar putea argumenta că, în principiu, o descriere completă a poveștii stimul–răspuns va fi oricum prezentă la nivelul atomic al sistemului. Însă există o eroare evidentă în acest vechi și uzat argument, pentru că nu ia în calcul deschiderea „sistemului". Dați-mi voie să explic. Timpii de reacție (în cazul degetelor înțepate, de pildă) sunt în general de ordinul unei zecimi de secundă. Acum să ne gândim că sistemul stimul–răspuns ar putea fi alcătuit din mii de neuroni legați între ei de milioane de axoni, neuronii activându-se de 50 de ori pe secundă. Amintiți-vă de discuția despre reglarea demonică a ionilor de sodiu și de potasiu care intră și părăsesc axonul pentru a stimula propagarea semnalului. Un neuron care se activează de 50 de ori pe secundă va trimite prin axon un semnal care presupune schimbul a milioane de ioni. Astfel, în zecimea de secundă în care se desfășoară povestea degetului mare, „sistemul" va schimba trilioane de particule atomice cu mediul extra-neuronal. Particulele care ies părăsesc lanțul cauzal organizat al sistemului și se pierd în zgomotul termic

Scanned with OKEN Scanner

aleatoriu al mediului, fiind înlocuite de altele care năvălesc înăuntru. Aşadar nu are sens să încercăm să localizăm la scară atomică nivelul cel mai de jos al informaţiei despre episodul cu degetul înţepat. *Chiar şi în principiu*, lanţul cauză–efect pe care încercăm să-l explicăm pur şi simplu *nu există* la nivelul respectiv.

Bine, răspunde reducţionistul convins, dar dacă luăm în calcul şi mediul sistemului, apoi mediul acelui sistem şi, tot aşa, până când perspectiva noastră ajunge să cuprindă întregul cosmos? În principiu (spune argumentul), tot ce se întâmplă, inclusiv activitatea modulelor cerebrale, ar putea fi explicat la nivel atomic sau subatomic. Astfel (zice reducţionistul), faptul de a invoca caracterul deschis al unui agent pentru a salva liberul-arbitru înseamnă a apela la o pseudoportiţă logică. În opinia mea însă, argumentul reducţionistului (susţinut deseori de oameni de ştiinţă respectabili) e absurd. Nu există nici o dovadă că universul ar fi un sistem determinist închis – ar putea fi infinit. Chiar dacă nu e infinit, este oricum un sistem cuantic indeterminist.

Creierul cuantic

Deşi indeterminismul cuantic nu poate explica voinţa deterministă, presupusa legătură dintre mecanica cuantică şi minte e profundă şi persistentă. Conexiunea dintre domeniul cuantic obscur şi lumea concretă a experienţei cotidiene e o arenă unde ne putem aştepta ca mintea şi materia să se întâlnească. În fizica cuantică, acest fenomen e numit „problemă de măsurare". Iată de ce e o problemă. În capitolul 5, am explicat cum, la nivel atomic, lucrurile devin ciudate şi neclare. Însă când facem o măsurătoare cuantică, rezultatele sunt precise şi bine definite. De exemplu, dacă măsurăm poziţia unei particule, obţinem un rezultat definit. Prin urmare, ceea ce înainte era neclar acum e limpede, incertitudinea e înlocuită de certitudine,

Scanned with OKEN Scanner

multe realități concurente sunt înlocuite de o singură lume specifică. Acum apare dificultatea că sistemul de măsurare (care poate fi un aparat, un laborator, un fizician, câțiva studenți etc.) este el însuși format din atomi și supus regulilor cuantice. Și nimic din regulile mecanicii cuantice așa cum au fost formulate de Schrödinger și de alții nu proiectează o anumită realitate concretă și unică din mulțimea de pseudorealități fantomatice și suprapuse specifice microlumii. Problema e atât de frustrantă, încât mai mulți fizicieni, printre care John von Neumann, au sugerat că „factorul de concretizare" (numit deseori „colapsul funcției de undă") poate fi *mintea* experimentatorului. Cu alte cuvinte, când rezultatul măsurătorii pătrunde în conștiința celui care face măsurătoarea (*poc!*), lumea cuantică nebuloasă se concretizează brusc într-o realitate comună. Dacă mintea poate face *asta* înseamnă că aceasta exercită o influență asupra materiei, chiar dacă într-un mod subtil? Trebuie să recunoaștem că astăzi mai există doar puțini adepți ai interpretării mentaliste a măsurătorii cuantice, deși tot nu există un consens cu privire la o explicație mai bună pentru ce se întâmplă când are loc o măsurătoare cuantică.

O nouă nuanță a relației dintre lumea cuantică și conștiința umană a fost introdusă acum circa 30 de ani de către matematicianul Roger Penrose de la Oxford.[16] Dacă lumea cuantică e influențată în vreun fel de conștiință, atunci, prin simetrie, ne putem aștepta ca efectele cuantice să joace un rol în generarea conștiinței, și e greu să ne dăm seama cum s-ar putea întâmpla asta dacă nu există efecte cuantice în creier. În capitolul 5, am descris cum domeniul biologiei cuantice ar putea explica fotosinteza și navigația la păsări, deci, a priori, neuronii ar putea să fie și ei influențați în comportamentul lor de procesele cuantice. Și exact așa sugerează Penrose că ar sta lucrurile. Mai precis, el susține că unii microtubuli din interiorul neuronilor ar putea procesa informația în mod cuantic, sporind enorm puterea de procesare a sistemului nervos și, cumva, generând

Scanned with OKEN Scanner

conştiinţă pe parcurs.[17] Ajungând la această concluzie, Penrose şi colegul său, anesteziologul Stuart Hameroff, au luat în calcul efectele anesteziei, care apare când o varietate de molecule ce pătrund în sinapsele neuronale elimină conştiinţa, lăsând neafectate cea mai mare parte a funcţiilor de rutină ale creierului – un proces încă neînţeles pe deplin.

Trebuie spus că teoria Penrose–Hameroff a fost întâmpinată cu mult scepticism. Obiecţiile ţin de problema decoerenţei, pe care am explicat-o în caseta 11. În mediul cald şi zgomotos din creier, efectele cuantice ar căpăta decoerenţă mai repede ca gândul. Cu toate astea, e greu să tragem concluzii precise, iar mecanica cuantică ne-a mai oferit surprize şi înainte.

Mai sus, am explicat cum Giulio Tononi şi colegii săi au definit o cantitate numită informaţie integrată, notată cu Φ, pe care ei o propun ca măsură matematică pentru nivelul de conştiinţă. Ideile lor ne oferă o altă metodă de a lega mecanica cuantică de conştiinţă. Să ne amintim că informaţia integrată cuantifică măsura în care întregul poate fi mai mare decât suma părţilor când un sistem e complex. Astfel, aceasta depinde de starea sistemului ca întreg: nu doar de dimensiune sau de complexitate, ci şi de organizarea componentelor sale şi de relaţia lor cu totalitatea. Un sistem cuantic simplu, precum un atom, are un Φ foarte scăzut, dar dacă atomul e conectat la un dispozitiv de măsurare, atunci Φ al întregului sistem poate fi crescut, în funcţie de natura dispozitivului. Cu siguranţă va fi foarte crescut dacă o fiinţă umană conştientă ar fi inclusă în sistem ca parte a „dispozitivului", dar elementul uman nu e necesar. Dar dacă modul în care sistemul cuantic se modifică în timp depinde de valoarea lui Φ? Atunci, lăsat singur, atomul ar respecta pur şi simplu regulile normale ale fizicii cuantice aplicabile atomilor prezentate de Schrödinger în anii '20. Însă, în cazul unui sistem suficient de complex, care conţine multă informaţie integrată (de exemplu, un observator uman), Φ va deveni important, în cele din urmă producând

Scanned with OKEN Scanner

colapsul funcției de undă (adică proiectarea într-o unică realitate concretă). Ceea ce propun e un alt exemplu de cauzalitate descendentă,[18] în care sistemul ca întreg (în cazul de față, definit precis din punct de vedere al informației integrate) exercită o forță cauzală asupra componentelor de nivel inferior (atomul). În exemplul meu e vorba despre o cauzalitate descendentă definită în termeni de *informație*, arătând limpede cum o lege a informației intră în fizica fundamentală.[19]

Oricât de merituoase ar fi aceste idei speculative, cred că e corect să spunem că, dacă vrem să introducem conștiința în cadrul teoriei fizice, atunci trebuie s-o incorporăm *cumva* în mecanica cuantică, pentru că mecanica cuantică e cea mai solidă descriere a naturii. Astfel, conștiința ori încalcă mecanica cuantică, ori e explicată de ea.

Conștiința e problema principală a științei, ba chiar a existenței. Cei mai mulți cercetători o evită, considerând-o un subiect mult prea complicat. De regulă, oamenii de știință și filozofii care au căutat s-o explice s-au împotmolit. Teoria informației oferă o cale de a merge înainte. Creierul e un organ de procesare a informației de o complexitate uluitoare și o organizare extrem de elaborată. Dacă ne uităm în urmă la istoria vieții, fiecare tranziție majoră a implicat reorganizarea arhitecturii informaționale a organismelor; creierul e cel mai recent pas înainte, creând tipare de informație care gândesc.

Însă nu toată lumea e de acord că rezolvarea problemei arhitecturii informaționale va „lămuri" conștiința, chiar dacă ne lăsăm convinși de teza conform căreia experiențele conștiente sunt formate de tipare de informație din creier. David Chalmers, un filozof australian de la Universitatea din New York, împarte subiectul în „problema ușoară" și „problema grea".[20] Partea ușoară (în practică, foarte departe de a fi ușoară) e cea a cartografierii elementelor neuronale corelate unei experiențe, adică determinarea acelei regiuni cerebrale care se „aprinde" când subiectul vede sau aude ceva. E un obiectiv care

Scanned with OKEN Scanner

poate fi atins. Însă, chiar dacă am ști toate corelatele, tot nu am afla „cum este“ să ai o experiență sau alta. Mă refer la aspectul subiectiv (cât de roșu ni se pare roșul, de exemplu), ceea ce filozofii numesc „qualia“. Unii consideră că problema grea presupusă de qualia nu poate fi niciodată rezolvată, în parte din același motiv pentru care eu nu pot fi sigur că voi existați doar pentru că vă comportați în linii mari la fel ca mine. Dacă așa stau lucrurile, întrebarea „Ce este mintea?“ va rămâne veșnic dincolo de puterea noastră de înțelegere.

Scanned with OKEN Scanner

EPILOG

Cel mai bine ne dăm seama cât de primitivă e încă fizica atunci când lucrăm cu ființe vii. —Albert Einstein[1]

Când și-a ținut prelegerile de la Dublin în 1943, Schrödinger a lansat o provocare importantă care rămâne valabilă până astăzi. Poate fi viața explicată prin fizică, sau va rămâne veșnic un mister? Dacă fizica poate explica viața, este oare fizica actuală în măsură s-o facă, sau e nevoie de ceva fundamental nou, de concepte noi, poate chiar de legi noi?

În ultimii câțiva ani, a devenit tot mai clar că informația formează o punte puternică între fizică și biologie. Interdependența informației, energiei și entropiei a fost clarificată abia de curând, la un secol și jumătate după ce Maxwell și-a ezentat celebrul demon. Progresele din nanotehnologie ne-au mis să facem experimente incredibil de fine pentru a testa robleme fundamentale aflate la intersecția dintre fizică, chimie, biologie și informatică. Deși aceste progrese ne-au oferit indicii utile, aplicarea fizicii informației asupra sistemelor vii a fost deocamdată neglijabilă și ad hoc. Încă nu am ajuns la un set de principii cuprinzătoare care să explice toate enigmele din cutia magică a vieții în cadrul unei teorii unitare.

Deși e *conținută* în materie, informația biologică nu e *inerentă* acesteia. Biții de informație își stabilesc propriul traseu înăuntrul ființelor vii. Astfel, ei nu încalcă legile fizicii, dar nici nu sunt constrânși de ele: e imposibil să derivăm legile informației pornind de la legile cunoscute ale fizicii. Pentru a asimila cum se cuvine materia vie în fizică avem nevoie de o

Scanned with OKEN Scanner

EPILOG

Cel mai bine ne dăm seama cât de primitivă e încă fizica atunci când lucrăm cu ființe vii. —Albert Einstein[1]

Când și-a ținut prelegerile de la Dublin în 1943, Schrödinger a lansat o provocare importantă care rămâne valabilă până astăzi. Poate fi viața explicată prin fizică, sau va rămâne veșnic un mister? Dacă fizica poate explica viața, este oare fizica actuală în măsură s-o facă, sau e nevoie de ceva fundamental nou, de concepte noi, poate chiar de legi noi?

În ultimii câțiva ani, a devenit tot mai clar că informația formează o punte puternică între fizică și biologie. Interdependența informației, energiei și entropiei a fost clarificată abia de curând, la un secol și jumătate după ce Maxwell și-a prezentat celebrul demon. Progresele din nanotehnologie ne-au permis să facem experimente incredibil de fine pentru a testa probleme fundamentale aflate la intersecția dintre fizică, chimie, biologie și informatică. Deși aceste progrese ne-au oferit indicii utile, aplicarea fizicii informației asupra sistemelor vii a fost deocamdată neglijabilă și ad hoc. Încă nu am ajuns la un set de principii cuprinzătoare care să explice toate enigmele din cutia magică a vieții în cadrul unei teorii unitare.

Deși e *conținută* în materie, informația biologică nu e *inerentă* acesteia. Biții de informație își stabilesc propriul traseu înăuntrul ființelor vii. Astfel, ei nu încalcă legile fizicii, dar nici nu sunt constrânși de ele: e imposibil să derivăm legile informației pornind de la legile cunoscute ale fizicii. Pentru a asimila cum se cuvine materia vie în fizică avem nevoie de o

Scanned with OKEN Scanner

fizică nouă. Dat fiind că prăpastia conceptuală dintre fizică şi biologie e atât de adâncă şi că legile existente ale fizicii oferă deja o explicaţie satisfăcătoare pentru atomii şi moleculele *individuale* care formează organismele vii, e limpede că o explicaţie completă a materiei vii presupune ceva cu totul şi cu totul mai profund: nici mai mult, nici mai puţin decât o revizuire a naturii legii fizice.

De-a lungul timpului, fizicienii s-au agăţat de o concepţie foarte restrictivă a legilor, datând de pe vremea lui Newton. Fizica aşa cum o cunoaştem s-a dezvoltat în Europa secolului al XVII-lea, care se afla în umbra doctrinei Bisericii Catolice. Deşi Galilei, Newton şi contemporanii lor au fost influenţaţi de gândirea greacă, concepţia acestora despre legi fizice era în mare parte tributară monoteismului, conform căruia o zeitate atotputernică stăpâneşte universul într-o manieră raţională şi inteligibilă. Primii oameni de ştiinţă considerau că legile fizicii sunt gânduri din mintea lui Dumnezeu. Teologia creştină clasică susţinea că Dumnezeu e perfect, veşnic, neschimbător şi că transcende spaţiul şi timpul. Dumnezeu a creat o lume fizică ce se schimbă odată cu trecerea timpului, însă Dumnezeu rămâne imuabil. Creatorul şi creaturile nu se află, aşadar, într-o relaţie simetrică: lumea depinde în totalitate de Dumnezeu pentru existenţa sa, dar Dumnezeu nu depinde de lume. Cum unii au susţinut că legile universului reflectă natura divină, decurge de aici că legile trebuie să fie şi ele neschimbătoare. În 1630, Descartes a exprimat foarte explicit acest punct de vedere:

> Dumnezeu e cel care a statornicit legile naturii, la fel cum un rege statorniceşte legile în propriul regat. [...] Vi se va spune că dacă Dumnezeu a stabilit aceste adevăruri, atunci le-ar putea şi schimba, la fel cum un rege îşi schimbă legile. La care voi trebuie să răspundeţi: da, dacă voia lui se poate schimba. Dar le socotesc pe ambele veşnice şi neschimbătoare. Şi la fel cred şi despre Dumnezeu.[2]

Scanned with OKEN Scanner

Din aceste motive esenţialmente teologice, fizica avea la bază acum trei secole o asimetrie între legile fixe şi lumea aflată în schimbare. Această idee s-a perpetuat de atâta vreme, încât abia dacă observăm ce supoziţie *uriaşă* este de fapt. Dar nu există nici o cerinţă *logică* pentru o astfel de stare a lucrurilor, nici un argument convingător conform căruia legile în sine trebuie să fie absolut fixe. Chiar am discutat despre un exemplu binecunoscut din fizica fundamentală în care legile se schimbă în funcţie de circumstanţe: măsurătoarea în cadrul mecanicii cuantice. Măsurarea sau observarea unui sistem cuantic presupune o schimbare dramatică a comportamentului acestuia, numită deseori „colapsul funcţiei de undă". Să recapitulăm cum funcţionează. De unul singur, un sistem cuantic (de exemplu un atom) evoluează* conform unei legi matematice precise stabilite de Schrödinger. Dar când sistemul e conectat la un aparat de măsurare şi se măsoară o cantitate (de exemplu, energia unui atom), starea atomului sare brusc („colapsează"). Faptul important este că prima evoluţie e reversibilă, dar a doua nu. Prin urmare, există două tipuri complet diferite de legi pentru sistemele cuantice: unul pentru când sunt lăsate în pace şi un altul pentru când sunt sondate. Se poate observa aici un indiciu ce ne trimite la informaţie. Dacă efectuează măsurătoarea unui sistem cuantic, experimentatorul obţine informaţii despre el (de exemplu, la ce nivel de energie se află un atom), însă entropia sistemului măsurat creşte brusc: după măsurătoare ştim mai puţin despre starea sa iniţială decât ştiam înainte din cauza faptului că acest „colaps" e ireversibil.** Prin urmare, am câştigat ceva şi am pierdut altceva.

---

* În fizică, verbul „a evolua" are un înţeles foarte diferit decât cel din biologie, fapt care poate crea confuzie.

** Ireversibilitatea provine din faptul că informaţia despre fazele diverselor ramuri ale funcţiei de undă au fost distruse prin măsurătoare.

Scanned with OKEN Scanner

Revenind la biologie, este limpede că noţiunea de legi imuabile nu se potriveşte. Darwin însuşi a insistat asupra acestei diferenţe cu multă vreme în urmă în ultimul pasaj din *Originea speciilor*: „În timp ce planeta noastră îşi continuă rotaţia după legea imuabilă a gravitaţiei, nenumărate forme dintre cele mai frumoase şi mai minunate, apărute dintr-un început atât de simplu, s-au dezvoltat şi continuă să se dezvolte".[3] Evoluţia biologică, plină de varietate şi noutate şi lipsită de predictibilitate, diferă foarte mult de felul în care evoluează sistemele neînsufleţite. Însă biologia nu înseamnă haos: există o mulţime de „reguli", dar ele se referă în general la arhitectura *informaţională* a organismelor. Gândiţi-vă la codul genetic: tripleta de nucleotide CGT, de pildă, codează aminoacidul arginină (vezi tabelul 1). Deşi nu există excepţii cunoscute de la această regulă, ar fi greşit s-o considerăm o lege a naturii, asemenea legii fixe a gravitaţiei. E aproape sigur că însărcinarea CGT-ului cu producerea argininei a avut loc cu multă vreme în urmă; probabil că a provenit dintr-o regulă mai simplă şi mai veche. Biologia e plină de astfel de cazuri: unele reguli sunt larg răspândite, precum legile mendeliene ale geneticii, în vreme ce altele sunt mai restrictive. Când ne gândim la marea poveste a istoriei evoluţioniste, jocul vieţii trebuie privit ca un proces bazat pe cvasireguli ce se schimbă în timp.

Mai relevant e că regulile depind deseori de *starea* sistemului avut în vedere. Pentru a explica acest aspect crucial, daţi-mi voie să fac o analogie. Şahul e un joc cu reguli fixe. Nu regulile stabilesc rezultatul jocului, ci jucătorii. Există un număr uriaş de configuraţii posibile, dar o privire mai atentă aruncată asupra tuturor jocurilor ar dezvălui că piesele se mişcă pe tablă în conformitate cu aceleaşi reguli. Să ne imaginăm acum un joc de şah diferit (să-i spunem şah-plus) în care regulile se pot schimba pe măsură ce se desfăşoară partida. Mai exact (pentru a păstra analogia cu sistemele vii), regulile se pot modifica în funcţie de *starea jocului*. Iată un posibil exemplu: dacă albul e

Scanned with OKEN Scanner

pe cale să câştige, atunci negrul are voie de-acum încolo să mute regele până la două căsuţe în loc de una; sau un altul: dacă negrul are cu doi pioni mai mulţi decât albul, atunci albul poate muta pioni atât înainte, cât şi înapoi. (Sunt propuneri caraghioase, dar nişte exemple mai puţin drastice ar putea fi considerat un joc popular. Dacă ar juca şah-plus, un novice ar avea şanse să învingă şi un mare maestru.) Cele două exemple pe care tocmai le-am pomenit presupun „reguli ale schimbării regulilor" sau metareguli care, în sine, sunt fixe. Dar această caracteristică e folosită doar pentru a uşura expunerea. Metaregulile nu trebuie să fie fixe: se pot supune unei meta-metareguli sau, pentru a evita o regresie la infinit, se pot schimba aleatoriu poate prin aruncarea unei monede. În acest din urmă caz, şahul-plus ar deveni în parte un joc de aptitudini şi în parte un joc de noroc. În orice caz, e limpede că şahul-plus ar fi mai complex şi mai puţin previzibil decât şahul convenţional, şi ar conduce la stări ale jocului (adică tipare ale mişcării pieselor pe tablă) *imposibil de reprodus* prin folosirea regulilor convenţionale şi fixe ale şahului. Asta ne aminteşte de biologie: viaţa deschide regiuni ale „spaţiului posibilităţii" inaccesibile sistemelor neînsufleţite (vezi pagina 21).

Legile care se schimbă ca funcţie a stării sunt o generalizare a conceptului autoreferenţialităţii: *activitatea unui sistem depinde de starea acelui sistem.* Ne amintim din capitolul 3 că autoreferenţialitatea, în urma cercetărilor lui Turing şi Von Neumann, se află la baza calculului *şi* a replicării universale. Relaxarea necesităţii stringente ca legile să fie fixe şi luarea în calcul a autoreferenţialităţii presupune o ramură nouă a ştiinţei şi a matematicii, deocamdată încă în mare parte neexplorată. Fizicianul Nigel Goldenfeld, de la Universitatea Illinois, e unul dintre puţinii teoreticieni care îşi dau seama de avantajele acestei abordări: „Autoreferenţialitatea ar trebui să facă parte din înţelegerea corectă a evoluţiei, însă este rareori luată în considerare în mod explicit",[4] scrie el. Goldenfield compară

Scanned with OKEN Scanner

biologia cu subiectele standard din fizică, precum teoria materiei condensate, unde „există o separare clară între regulile care guvernează evoluția în timp a sistemului și starea sistemului însuși [...], ecuația de bilanț nu depinde de soluția ecuației. În biologie însă, situația stă altfel. Regulile care guvernează evoluția în timp a sistemului sunt codificate în abstracții, cel mai evident exemplu fiind chiar genomul. Pe măsură ce sistemul evoluează în timp, genomul poate fi modificat, astfel încât regulile se schimbă și ele. Din perspectiva informaticii, am putea spune că lumea fizică e modelată de două componente diferite: programul și datele. Însă, în lumea biologică, programul reprezintă datele și invers".[5]

În capitolul 3, am descris o tentativă simplă a colegilor mei Alyssa Adams și Sara Walker de a incorpora reguli dependente de stare și autoreferențiale într-un automat celular (vezi pagina 104). Cum era de așteptat, modelul computerizat al celor două cercetătoare a prezentat proprietatea fundamentală a varietății nedeterminate pe care o asociem vieții. Însă era doar un rezultat teoretic. O analiză realistă ar presupune să aplicăm reguli autoreferențiale dependente de stare unor tipare de informație din sisteme fizice complexe *reale*. Acest lucru nu s-a mai făcut până acum: îl propun aici sub formă de provocare.[6] Regulile rezultate vor fi diferite de legile convenționale ale fizicii pentru că se aplică la nivelul *sistemelor*, nu la cel al componentelor individuale precum particulele, fiind un exemplu de cauzalitate descendentă.[7] Pentru a fi compatibile cu legile cunoscute ale fizicii, orice efecte de la nivelul particulelor trebuie să fie mici, altfel, le-am fi observat deja. Dar acest lucru nu reprezintă un obstacol. Întrucât sistemele moleculare sunt inerent haotice și nu ies în evidență, schimbările minuscule se pot acumula și produce efecte extrem de profunde. Există destul loc ca fizica nouă să opereze într-o manieră până acum nedetectată și care, oricum, ar fi greu de detectat la nivelul moleculelor individuale. Însă impactul cumulat asupra flu-

Scanned with OKEN Scanner

xului de informație în cadrul unui sistem întreg (ce rezultă din efectul combinat al mai multor influențe mici) ar putea ajunge să domine, rămânând însă inexplicabil, deoarece mecanismul cauzal subiacent a fost trecut cu vederea.

Posibilitatea existenței unor noi legi (sau cel puțin regularități sistematice) ascunse în comportamentul sistemelor complexe nu e deloc o idee revoluționară. Acum câteva zeci de ani s-a descoperit că tiparele matematice subtile erau îngropate într-o gamă largă de sisteme *haotice* (în cazul de față, „haotic" înseamnă faptul că astfel de sisteme sunt imprevizibile chiar și atunci când cunoaștem foarte bine forțele și condițiile inițiale; un exemplu consacrat de sistem haotic e starea vremii). Fizicienii au început să vorbească despre „universalitate în haos". Ceea ce propun aici e *universalitate în organizarea informațională*, în speranța că tiparele de informație comune vor fi descoperite într-o clasă numeroasă a anumitor sisteme complexe (tipare care surprind, măcar parțial, ceva din trăsăturile organismelor vii).

Cam atât cu teoria, care nu a atins decât suprafața acestor idei noi. Care e perspectiva unor viitoare experimente? Aici ne lovim de complexitatea copleșitoare a biologiei. Dacă noile legi informaționale dependente de stare pe care le propun ar opera doar la nivelul materiei vii, atunci am discuta despre o altă variantă a vitalismului. Scopul unei teorii ce reunește fizica și biologia e să elimine orice barieră care le separă, caz în care ne putem aștepta la noile legi informaționale să pătrundă din lumea vie în lumea non-vie. Acum câteva zeci de ani, Sidney Fox, un biochimist din Alabama care și-a petrecut întreaga carieră studiind originea vieții, a susținut că descoperise exact un astfel de efect. Fox a publicat dovezi experimentale care ar arăta că, atunci când formează catene (numite peptide), aminoacizii manifestă o preferință pentru exact acele combinații care formează molecule utile biologic, adică proteine. „Aminoacizii își stabilesc propria ordine în condensare",

Scanned with OKEN Scanner

scria el.[8] Dacă e adevărat, această afirmație ar fi dovada că legile chimiei favorizează cumva viața, ca și cum ar ști despre ea dinainte. Și mai dramatice au fost ideile lui Gary Steinman și Marian Cole de la Universitatea de Stat din Pennsylvania, care au observat la rândul lor formarea non-aleatorie a peptidelor: „Rezultatele ne obligă să speculăm că e posibil ca secvențe unice, pertinente biologic, ale peptidelor să fi fost produse în regim prebiotic".[9]

Teoria conform căreia chimia ar fi „măsluită" în favoarea vieții a fost în general respinsă. De fapt, era greu de crezut în forma prezentată de Fox și de ceilalți, care presupunea unirea preferențială dintre perechi de molecule (un proces bine înțeles în cadrul mecanicii cuantice). Dar dacă am adopta o abordare informațională a organizării moleculelor e posibil ca lucrurile să se schimbe.[10]

Dacă am identifica cum se cuvine candidații la rangul de reguli informaționale dependente de stare, aceștia ne-ar putea arăta că sistemele se autoorganizează astfel încât să-și amplifice capacitățile de procesare a informației sau conduc la acumulări „nerezonabile" de informație integrată. Descoperirea recentă că, în anumite circumstanțe, „macro poate înfrânge micro" din punctul de vedere al puterii cauzale (vezi pagina 254) lasă deschisă posibilitatea ca organizarea spontană a modulelor de ordin superior de procesare a informației să fie favorizată în calitate de tendință generală a sistemelor complexe. Calea de la non-viață la viață ar putea fi mult mai scurtă dacă o privim din punctul de vedere al organizării informației, și nu din cel al complexității chimice. Dacă așa stau lucrurile, căutarea unei a doua geneze a vieții ar avansa enorm.*

* Mulți oameni de știință (printre care și de Duve) susțin ideea unui imperativ cosmic fără a simți nevoia existenței unor legi sau principii noi care să accelereze geneza vieții. Ei fac apel la caracterul general al legilor chimiei cunoscute și se feresc de parohialism – de ce să fim noi/

Scanned with OKEN Scanner

În această carte am cartografiat un nou domeniu al științei aflat în plină formare. În timp ce scriu aceste rânduri, abia dacă trece o zi fără să se publice un nou articol sau să fie anunțat un nou rezultat experimental care are un impact direct asupra fizicii informației și a rolului acesteia în povestea vieții. E un domeniu aflat la început și multe întrebări încă nu și-au găsit răspuns. Dacă avem de-a face cu o serie de legi noi ale fizicii (legi informaționale ce presupun poate dependența de stare și cauzalitatea descendentă), cum le putem combina cu legile fizicii descoperite până acum? În plus, aceste legi noi vor avea oare formă deterministă, sau vor conține un element de incertitudine, precum mecanica cuantică? Oare mecanica cuantică are vreo legătură cu ele? Oare joacă vreun rol esențial în viață? Pe lângă aceste dileme mai există și problema apariției vieții. Cum apar tiparele informaționale ale vieții? Formarea oricărui lucru nou în univers e întotdeauna un amalgam de legi și condiții inițiale. Pur și simplu nu cunoaștem condițiile necesare pentru apariția informației biologice și nici cât de important e rolul selecției naturale față de acțiunea legilor informaționale sau a altor principii organizaționale care ar putea funcționa în sistemele complexe. Toate acestea trebuie lămurite.

Unele persoane nu vor fi de acord să confere principiilor informaționale discutate până acum titlul de „lege“ în vreun sens profund. Deși majoritatea oamenilor de știință se mulțumesc să trateze tiparele de informație drept lucruri în sine în scopuri *practice*, reducționiștii insistă că această abordare nu e decât o convenție metodologică și că, în principiu, toate „lucrurile“ de genul acesta pot fi reduse la particule fundamentale

---

Pământul atât de speciali? Dar această atitudine are la bază un fel de gândire deziderativă. Sunt complet sceptic că am putea găsi vreun principiu vital sădit în chimia cunoscută, având în vedere că aceasta nu stabilește nici o punte conceptuală între molecule și informație.

Scanned with OKEN Scanner

și la legile fizicii; prin urmare, eliminate din existență prin definiție. Suntem avertizați că ele „nu există cu adevărat", ci doar în imaginația noastră. Deși ar putea admite că anumite reguli „emerg" în sisteme complexe, reducționiștii vor spune că aceste reguli nu se bucură de statutul fundamental al legilor fizicii subiacente tuturor sistemelor. Argumentul reducționist este, fără îndoială, puternic, dar se bazează pe o ipoteză majoră cu privire la natura legilor fizice. Felul în care legile fizicii sunt concepute la ora actuală duce la o stratificare a sistemelor fizice, astfel încât legile fizicii se află la nivelul conceptual cel mai de jos, iar legile emergente sunt așezate deasupra lor. Nu există nici o legătură între niveluri. Când vine vorba de sisteme vii, această stratificare e nepotrivită deoarece, în biologie, există deseori legături între niveluri, între procese desfășurate la diverse scări ce țin de dimensiune și de complexitate: cauzalitatea poate fi atât ascendentă (de la gene la organisme), cât și descendentă (de la organisme la gene). Pentru a aduce viața sub incidența legilor fizicii (și în vederea creării unei baze solide pentru realitatea informației ca entitate fundamentală de sine stătătoare) e nevoie de o reevaluare radicală a naturii legilor fizicii.[11]

Ar fi greșit să credem că aceste discuții complicate sunt importante doar pentru câțiva oameni de știință, filozofi și matematicieni. Ele au implicații uriașe nu doar pentru încercarea de a explica viața, ci și pentru natura existenței umane și locul nostru în univers. Înainte de Darwin, se credea că Dumnezeu a creat viața. Astăzi, majoritatea oamenilor acceptă că a avut o origine naturală. Deși e adevărat că oamenii de știință nu pot explica pe deplin cum a apărut viața din non-viață, invocarea unui miracol care s-a petrecut o singură dată înseamnă să cădem în capcana „dumnezeului lacunelor". Ar presupune existența unui magician cosmic care intervine sporadic, mișcând moleculele din când în când, dar, în cea mai mare parte a timpului, lăsându-le să se supună unor legi fixe. Însă

Scanned with OKEN Scanner

în plaja acoperită de termenul „naturalism" se află implicații filozofice (chiar teologice) foarte diferite. Două perspective contrastante asupra originii vieții sunt ipoteza hazardului statistic susținută de Jacques Monod și imperativul cosmic al lui Christian de Duve. Monod a făcut apel la hazardul vieții pentru a-și susține filozofia nihilistă. „Vechea alianță s-a destrămat", a scris el cu mâhnire. „Ca și destinul său, datoria [omului] nu este scrisă nicăieri. El singur trebuie să aleagă între împărăție și tenebre. [...] Universul nu purta în pântecele său viața, și nici biosfera omul."[12] Ca răspuns la reflecțiile negative ale lui Monod, de Duve a scris: „Te înșeli. Ambele purtau în pântece"[13], și apoi și-a dezvoltat perspectiva asupra a ceea ce a numit „un univers încărcat de sens". În esență, problema e următoarea. Este viața întipărită în legile fizicii? Oare aceste legi cuprind în chip magic proiectul viitoarelor organisme? Nu există nici o dovadă că legile *cunoscute* ale fizicii ar fi înclinate în favoarea apariției vieții: ele sunt indiferente față de viață. Dar cum rămâne cu noile legi informaționale dependente de stare pe care le propun aici? Bănuiala mea e că nu ar fi atât de specifice încât să anticipeze biologia ca atare, dar ar putea favoriza apariția unei clase mai largi de sisteme complexe de gestionare a informației, care știm că sunt caracteristice în general vieții așa cum o cunoaștem. E plăcut să te gândești că legile universului ar putea fi intrinsec favorabile biologiei în acest sens general.

Aceste idei speculative sunt foarte departe de divinitatea care creează viața din țărână. Însă dacă emergența vieții și poate chiar a minții sunt înscrise în legile fundamentale ale naturii, atunci existența noastră ca ființe vii și cugetătoare ar căpăta un sens la nivel cosmic.

Ar fi un univers în care ne-am simți cu adevărat ca acasă.

Scanned with OKEN Scanner

NOTE

1. CE *ESTE* VIAȚA?

1. Erwin Schrödinger, *What is Life?*, Cambridge University Press, 1944, p. 23 [Erwin Schrödinger, *Ce este viața?*, trad. de V. Efimov, Editura Politică, București, 1980, p. 90 (*n. red.*)].
2. Charles Darwin, *On the Origin of Species*, John Murray; ed. a doua, 1860, p. 490 [Charles Darwin, *Originea speciilor*, trad. de Ion E. Fuhn, Editura Herald, 2017, p. 517 (*n. tr.*)].
3. David Deutsch, *The Beginning of Infinity: Explanations that Transform the World*, Penguin, 2011.
4. S.I. Walker, „The Descent of Math", în A. Aguirre, B. Foster, Z. Merali (ed.), *Trick of Truth: The Mysterious Connection between Physics and Mathematics*, Springer, 2016.
5. Richard Dawkins, *Climbing Mount Improbable*, Norton, 1996.
6. Eric Smith, Harold Morowitz, *The Origin and Nature of Life on Earth*, Cambridge University Press, 2016.
7. Bernd-Olaf Küppers, „The nucleation of semantic information in prebiotic matter", în E. Domingo, P. Schuster (ed.), *Quasispecies: From Theory to Experimental Systems. Current Topics in Microbiology and Immunology*, vol. 392, pp. 23-42. Vezi și Carlo Rovelli, „Meaning and intentionality = information + evolution", în A. Aguirre, B. Foster, Z. MErali (ed.), *Wandering Towards a Goal: How Can Mindless Mathematical Laws Give Rise to Aims and Intention?*, Springer, 2018, pp. 17-27.
8. Eric Smith, „Chemical Carnot cycles, Landauer's principle and the thermodynamics of natural selection", prelegere, Bariloche Complex Systems Summer School (2008).

Scanned with OKEN Scanner

Apariția vieții și capacitatea sa de a genera ordine din haos sunt enigme care încă nu au primit un răspuns definitiv. Renumitul fizician Paul Davies susține că, pentru a lămuri aceste enigme, trebuie mai întâi să răspundem la o întrebare mai adâncă: „Ce este informația?" Ca să înțelegem natura și originea vieții, Davies ne propune să adoptăm o perspectivă asupra biologiei potrivit căreia fundamentele vieții sunt asemănătoare sistemelor cibernetice, în sensul în care viața așa cum o cunoaștem ar trebui să fie considerată un fenomen asemănător stocării și gestionării informației. Pătrunzând în adevărata mecanică a fenomenelor din lumea fizică obișnuită, Davies ne arată cum procesele biologice, de la fotosinteză la capacitatea de orientare a păsărilor, se bazează pe mecanica cuantică, și cum fizica cuantică și procesarea informației ar putea constitui cheia dezlegării misterului vieții de pe Pământ. Folosind un limbaj accesibil, *Rețelele de informație și misterul vieții* expune diferite teorii interdisciplinare pentru a ne purta într-o călătorie edificatoare către țelul suprem al științei: unificarea tuturor teoriilor din biologie și fizică, astfel încât omenirea să poată înțelege locul pe care îl ocupă în univers.

O carte care depășește orice graniță... Davies susține că trăsăturile definitorii ale vieții pot fi mai bine înțelese în termenii informației... Este o uimitoare perspectivă asupra vieții. —*NATURE*

Cartea lui Davies este o expunere elocventă a noii matematici a biologiei, unde fluxul informațional joacă un rol central.

—*THE TELEGRAPH*

Davies – unul dintre cei mai plini de imaginație oameni de știință actuali – le cere biologilor care cercetează originea și evoluția vieții să acorde mai multă atenție fluxului de informație și de energie, pe lângă chimia și fizica cu care ne-am obișnuit. Davies este cea mai potrivită persoană care să ne introducă în noul domeniu al științelor informației ca factor-cheie în cercetarea lumii vii.

—*THE FINANCIAL TIMES*

Lei 50,00

Scanned with OKEN Scanner